VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA

ZÁKLADY FYZIKY

Modul 2 – Mechanika tekutin a termika

Jana Trojková

Vytvořeno v rámci projektu Operačního programu Rozvoje lidských zdrojů
CZ.04.1.03/3.2.15.1/0016
Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu
studia.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky

Obsah:

Informace o projektu	2
Úvod	3
Pokyny ke studiu	4
Přehled učiva	7
2.1 Tekutiny. Tlak	11
2.2 Hydrostatický a atmosférický tlak. Vztlaková síla	16
2.3 Povrchové napětí. Kapilarita	23
2.4 Proudění ideální tekutiny	31
2.5 Teplota a teplotní stupnice	37
2.6 Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin	41
2.7 Termodynamická soustava. Vnitřní energie, práce, teplo	47
2.8 Látka jako soustava částic	51
2.9 Ideální plyn, stavová rovnice	56
2.10 Tepelná kapacita	63
2.11 Změny skupenství látek	68
2.12 Přenos tepla	74
Klíč k modulu 2	83
Literatura k modulu 2	90
Tabulky k modulu 2	91

Studijní opory s převažujícími distančními prvky pro předměty teoretického základu studia

je název projektu, který uspěl v rámci první výzvy Operačního programu Rozvoj lidských zdrojů. Projekt je spolufinancován státním rozpočtem ČR a Evropským sociálním fondem. Partnery projektu jsou Regionální středisko výchovy a vzdělávání, s.r.o. v Mostě, Univerzita obrany v Brně a Technická univerzita v Liberci. Projekt byl zahájen 5.1.2006 a bude ukončen 4.1.2008.

Cílem projektu je zpracování studijních materiálů z matematiky, deskriptivní geometrie, fyziky a chemie tak, aby umožnily především samostatné studium a tím minimalizovaly počet kontaktních hodin s učitelem. Je zřejmé, že vytvořené texty jsou určeny studentům všech forem studia. Studenti kombinované a distanční formy studia je využijí k samostudiu, studenti v prezenční formě si mohou doplnit získané vědomosti. Všem studentům texty pomohou při procvičení a ověření získaných vědomostí. Nezanedbatelným cílem projektu je umožnit zvýšení kvalifikace širokému spektru osob, které nemohly ve studiu na vysoké škole z různých důvodů (sociálních, rodinných, politických) pokračovat bezprostředně po maturitě.

V rámci projektu jsou vytvořeny jednak standardní učební texty v tištěné podobě, koncipované pro samostatné studium, jednak e-learningové studijní materiály, přístupné prostřednictvím internetu. Součástí výstupů je rovněž banka testových úloh pro jednotlivé předměty, na níž si studenti ověří, do jaké míry zvládli prostudované učivo.

Bližší informace o projektu můžete najít na adrese http://www.studopory.vsb.cz/.

Přejeme vám mnoho úspěchů při studiu a budeme mít radost, pokud vám předložený text pomůže při studiu a bude se vám líbit. Protože nikdo není neomylný, mohou se i v tomto textu objevit nejasnosti a chyby. Předem se za ně omlouváme a budeme vám vděčni, pokud nás na ně upozorníte.

Úvod

Vážení studující,

dostáváte do rukou druhý ze studijních materiálů kurzu Základy fyziky: Modul 2 - Mechanika tekutin a termika. Kurz má posloužit k opakování a samostatnému studiu všem studentům, kteří cítí nedostatky ve svých středoškolských znalostech fyziky. Jednak těm, kteří se teprve připravují ke studiu vysoké škole, jednak i těm, kteří ji již studují a zjišťují, že bez dobrého základu ze střední školy vysokoškolský kurz fyziky jen těžko zvládnou.

Stejně jako zbývající tři moduly máte i tento k dispozici ve formě multimediálního CD nebo programu přístupného přes Internet. Obsahově se tyto materiály neliší, pouze LMS (Learning Management System), ke kterému se připojíte přes Internet, vám nabídne větší uživatelský komfort při kontaktu s tutorem a v organizačních záležitostech. Pro studium v době, kdy nemáte k dispozici počítač, byla jako doplňkový materiál vytvořena i textová verze tohoto materiálu.

Celý kurz je napsán tak, abyste učivo zvládli pokud možno samostatně. Aby měla vaše práce smysl, musíte nad studovanou látkou přemýšlet a neučit se ji mechanicky nazpaměť. Důležité je, abyste látku doopravdy pochopili. To si ověříte i prostřednictvím kontrolních otázek a úloh k samostatnému řešení. Pro případ, že byste nebyli schopni sami bez pomoci překonat nějaký problém, máte v organizovaných kurzech k dispozici svého tutora.

Než se pustíte do vlastního studia vybraných kapitol tohoto modulu, přečtěte si prosím pozorně následující část příručky nazvanou Pokyny ke studiu. Obsahuje obecné informace i některé konkrétní detaily, jak s tímto materiálem pracovat (protože jednotlivé moduly zpracovávali různí autoři, může se jejich systém zpracování mírně lišit).

Po Pokynech ke studiu následuje kapitolka Přehled učiva, kde se podrobněji dozvíte, jakým tématům se jednotlivé kapitoly modulu věnují. Pro snadnější orientaci jsou nově definované klíčové pojmy zvýrazněny tučně a nejdůležitější zákony a rovnice tučně kurzívou. Studujete-li samostatně, tento přehled vám pomůže si vybrat kapitoly, které vás zajímají.

Pokyny ke studiu

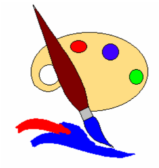
Každá kapitola tohoto modulu představuje poměrně krátkou část učiva, učební jednotku, kterou byste měli pokud možno studovat vcelku. Nemusíte však vždy nutně studovat všechny moduly a kapitoly. Zda je zvládnutí tématu některé kapitoly nezbytné pro pochopení kapitol dalších, zjistíte jednak v následujícím přehledu učiva, jednak po přečtení požadovaných předběžných znalostí na začátku každé učební jednotky. A samozřejmě v organizovaných kurzech bude stanoveno, které části jsou pro vás povinné. Učební jednotky mají následující strukturu.

Nejdříve se seznamte se **Studijními cíli**. Studijní cíle určují, co byste se měli naučit absolvováním příslušné partie. Jsou to znalosti, které využijete při dalším studiu na vysoké škole a budete je potřebovat při studiu odborných předmětů. Pokud máte pocit, že uvedené věci již znáte, můžete danou kapitolu absolvovat poměrně rychle. Přesto doporučuji ji celou nepřeskočit, ale ověřit si, že danou problematiku skutečně ovládáte, prostřednictvím kontrolních otázek a úloh k řešení.

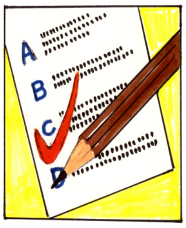
Ikona **Studijní čas** vám orientačně napoví, kolik asi času budete potřebovat k prostudování této kapitoly. Do tohoto času není zahrnuta doba potřebná k doplnění požadovaných předběžných znalostí, protože ta se může u jednotlivých studentů velmi lišit. Studijní čas jednotlivých celků je různý, od 30 do 120 minut. Postupně sami zjistíte, zda jste většinou schopni zvládnout učební jednotku rychleji, než je uvedeno, nebo potřebujete spíše více času. Záleží i na tom, jak často budete chybovat (a tedy se i opravovat) při odpovídání na kontrolní otázky a řešení úloh. V každém případě nezáleží na čase, ale na tom, abyste skutečně dosáhli stanovených studijních cílů.

Pod ikonou **Předběžné znalosti** máte uvedeno, které pojmy je nutné znát před začátkem studia této kapitoly. Promyslete si nejprve sami, co znamenají, správnost si pak v elektronických verzích můžete ověřit prokliknutím na příslušný odkaz. Tyto odkazy ovšem slouží pouze k připomenutí již dříve nastudovaných pojmů, v žádném případě nenahrazují ucelený výklad! Pokud jste se s některým z uvedených pojmů dosud vůbec nesetkali, seznamte se s ním podrobně v příslušné kapitole.

Poté, co si ověříte, že máte požadované předběžné znalosti a dostatek času ke zvládnutí dané kapitoly, pusťte se do studia **Studijního textu**. Zde naleznete výklad dané části učiva, doprovázený názornými obrázky, grafy, tabulkami a animacemi, případně i řešenými příklady. Procházejte jej nejlépe v pořadí, v jakém je sestaven. Mějte po ruce papír a tužku, dělejte si poznámky, provádějte odvození souběžně s výkladem. Soustřeďte se a v případě potřeby se vraťte, ale nesnažte se učit text ani jeho zvýrazněné pasáže nazpaměť. Definice a zákony byste měli být schopni formulovat vlastními slovy. Mějte na mysli studijní cíle, jichž chcete dosáhnout. Po zodpovězení následujících kontrolních otázek a vyřešení zadaných úloh zjistíte, nakolik jste tématu porozuměli a získáte doporučení, jak pokračovat v dalším studiu.

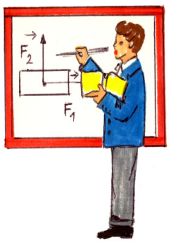


S touto ikonkou se setkáte pouze ve verzi určené k tisku – označuje jednoduché **Doplňky** zahrnující ilustrativní příklady, odvození nebo aplikace, které jsou v elektronické verzi realizovány formou animací. Tyto doplňky jsou od ostatního textu odděleny z obou stran vodorovnými čarami.



Studijní text je následován **Kontrolními otázkami**. Kontrolní otázky jsou bodovány. Některé kontrolní otázky vám dávají možnost vybrat odpověď z nabízených variant, pak může být správná jedna nebo i více možností. Za zcela správnou odpověď je pak považována ta, která zahrnuje všechny správné a žádnou nesprávnou možnost. U dalších otázek máte odpověď sami doplnit, ať už slovně nebo jako výsledek s jednotkou či pouhou jednotku. Vždy si nejprve otázku sami zodpovězte, pak teprve se podívejte na správné řešení. Toto v tištěné verzi naleznete v klíči na konci modulu. V elektronické interaktivní verzi, ať už on-line nebo na CD, řešení odkryjete kliknutím na hůlčičku: 

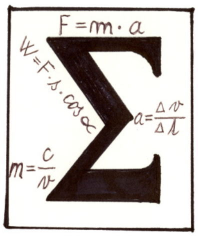
(vždy si promyslete, v čem jste případně udělali chybu, neporadíte-li si sami, kontaktujte svého tutora!) a postupte dále.



Po kontrolních otázkách je většinou uveden **Řešený příklad**. I řešený příklad se pokuste nejprve vypočítat sami. Pokud to zvládnete, neměli byste mít problémy ani s dalšími úlohami. Pokud ne, nevadí, snažte se porozumět metodě řešení na tomto modelovém příkladu tak, abyste již samostatně zvládli následující úlohy.

Úlohy k řešení byste už měli zvládnout vyřešit zcela sami. K řešení můžete podle potřeby používat kalkulátory a tabulky. Pište si poznámky, nejlépe do vyhrazeného sešitu. Nejprve vždy nalezněte obecné řešení (vzorec tvořený zadanými veličinami, případně i potřebnými fyzikálními konstantami), až nakonec dosaďte numerické hodnoty a vypočtěte numerický výsledek. Ten pak (není-li v zadání uvedeno jinak) vhodně zaokrouhlete a doplňte jednotku. Pak teprve si zkontrolujte řešení (stejným způsobem jako u kontrolních otázek). Není-li vaše odpověď zcela správná, vždy si promyslete, v čem jste udělali chybu, neporadíte-li si sami, kontaktujte svého tutora!

U kontrolních otázek a úloh k řešení nebuďte netrpěliví a nepokoušejte se bez vlastní snahy o řešení se ke správným výsledkům prostě „proklikat“, nebo si je rovnou číst v klíči. Tak se nic nenaučíte.



Po prostudování celé textové části je studijní jednotka uzavřena shrnutím. Mělo by obsahovat to, co je z celé kapitoly nejdůležitější. **Vlastní shrnutí** pište stručně, ale srozumitelně na papír nebo do vyhrazeného sešitu.

Vaše shrnutí pak porovnejte se **Vzorovým shrnutím** a sami zhodnoťte, nakolik jste byli úspěšní. Ani v časové tísni nepodléhejte pokušení přeskočit všechny předchozí části a naučit se zpaměti pouze shrnutí. Takto fyzice (a nejen jí) nikdy neporozumíte a nebudete ji umět použít k řešení problémů, s nimiž se při studiu i v praxi setkáte.

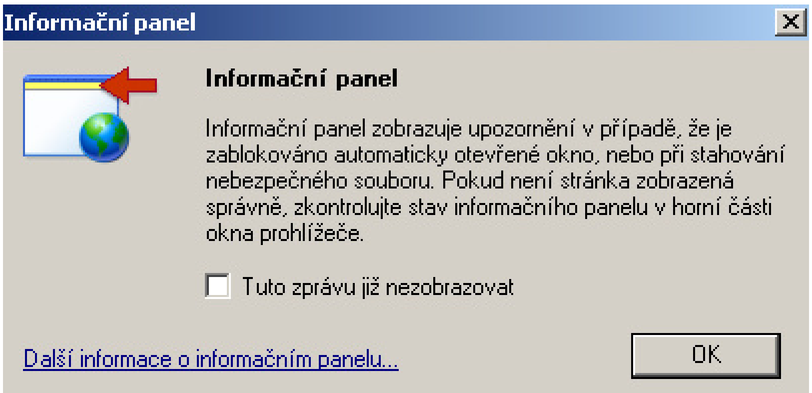
Jako doplněk jsou vám k dispozici fyzikální tabulky, tyto využívejte průběžně podle potřeby.

Nakonec zhodnoťte vaši celkovou úspěšnost při řešení úloh a kontrolních otázek a zvažte, zda postoupit ve studiu dále, nebo si raději problematické pasáže ještě jednou zopakovat.

Na závěr ještě pár technických poznámek k ovládání elektronické verze výukového programu:

1. On-line verzi výukového programu naleznete na http://rccv.vsb.cz/ **.** Pak v levé nabídce klikněte na LMS-iTutor4 a Studentský přístup, kde se již přihlásíte pod přiděleným jménem a heslem.
2. Po vložení CD do mechaniky se program obvykle automaticky spustí. Pokud se program „nerozběhne“ najděte si soubor „start.html“ a po jeho dvojím odkliknutí se program spustí.

V obou případech k fungování programu potřebujete Internet Explorer a pokud nemáte nainstalovánu potřebnou komponentu přehrávače Flash, můžete si ji nainstalovat přímo pomocí nabídky na obrazovce. Po spuštění CD nebo přihlášení na stránku RCCV se Vám také může zobrazit následující hlášení:



V tomto případě prosím proveďte odblokování automaticky otevíraných oken.

Další ovládání výukového programu je intuitivní.

Přehled učiva

V této části najdete přehled celé probírané látky. Obsah každé kapitoly je zde krátce popsán tak, abyste se mohli rychle zorientovat v celém modulu a případně si vybrat jen ty části, které vás zajímají nebo které potřebujete prostudovat.

MODUL 2 - Mechanika tekutin a termika

1) Tekutiny. Tlak

V této kapitole naleznete definici pojmu **tekutina**. Tekutiny zahrnují kapaliny a plyny, dozvíte se, jaké jsou jejich společné a naopak rozdílné vlastnosti. Seznámíte se také s jednoduchým idealizovaným, ale užitečným modelem kapaliny - **ideální kapalinou** a plynu - **ideálním plynem**.

Naučíte se definovat slovně i vzorcem veličinu zvanou **tlak**, bez s níž se neobejdete ve většině následujících kapitol. Na závěr se seznámíte s ***Pascalovým zákonem*** a jednoduchými přístroji, využívajícími jeho platnosti (např. hydraulická a pneumatická zařízení).

2) Hydrostatický a atmosférický tlak. Vztlaková síla

Dozvíte se, co je **atmosférický tlak** a jaká je přibližná hodnota normálního atmosférického tlaku.

Seznámíte se s příčinou vzniku **hydrostatického tlaku** a jeho rozložením v kapalině nacházející se v klidu v tíhovém poli. Zjistíte, na jakém principu fungují jednoduchá zařízení určená k měření tlaku - rtuťový barometr, otevřený manometr.

Pochopíte, proč na tělesa ponořená v kapalině působí **vztlaková síla** a na čem závisí její velikost, což popisuje tzv. ***Archimedův zákon***. Naučíte se řešit jednoduché fyzikální problémy využitím tohoto zákona, například rozhodnout, která tělesa při ponoření do vody budou plovat na její hladině a která se potopí, případně jak velkou částí se ponoří a podobně.

Zvládnutí této látky je potřebné pro pochopení obsahu následujících dvou kapitol.

3) Povrchové napětí. Kapilarita

Seznámíte se s veličinou nazvanou **povrchové napětí** a s tím, které jevy známé z běžného života souvisejí s existencí povrchového napětí (proč například můžeme z mýdlového nebo saponátového roztoku snadno vyfouknout bublinu a z čisté vody ne?). Dozvíte se, jak souvisí povrchové napětí s povrchovou energií. Naučíte se vyhledat hodnoty povrchového napětí v tabulkách a využít je při řešení jednoduchých úloh.

Dále se dozvíte, jak a proč zakřivuje svůj povrch kapalina při okraji nádoby a co se rozumí pod označením kapalina **smáčí**, resp. **nesmáčí** stěny nádoby. Pochopíte, kdy vzniká tzv. **kapilární tlak** a na čem závisí jeho velikost. V důsledku jeho existence vystoupí nebo poklesne hladina dané kapaliny v **kapiláře** (tenké trubičce) ponořené jedním koncem do kapaliny vůči okolní hladině, naučíte se vypočítat o kolik.

Zvládnutí této kapitoly není nezbytné pro pochopení následujících kapitol, v případě potřeby ji lze bez problémů vynechat.

4) Proudění ideální tekutiny

Tato kapitola se věnuje popisu nejjednoduššího případu kapaliny v pohybu - kapaliny proudící ustáleným prouděním. Naleznete zde definici **proudnice, proudové trubice** a **proudového vlákna**. Seznámíte se s novou veličinou nazvanou **objemový tok kapaliny**. Pochopíte, kdy a proč platí ***rovnice spojitosti toku (kontinuity)***.

Ve druhé části této kapitoly se seznámíte se zákonem zachování energie v proudící ideální tekutině - ***Bernoulliovou rovnicí***. Naučíte se využít rovnice spojitosti a Bernoulliovy rovnice pro řešení úloh.

Protože tato kapitola se prakticky jako jediná z celého modulu věnuje tekutině v pohybu, její zvládnutí není nezbytné pro pochopení následujících kapitol.

5) Teplota a teplotní stupnice

Veličinu nazvanou **teplota** všichni v běžném životě používáte. V této kapitole se s ní blíže seznámíte jako s veličinou udávající směr **tepelné výměny** mezi tělesy. Setkáte se zde také poprvé s pojmy **termodynamika** a **tepelná rovnováha**. Dále jsou zde popsány dvě teplotní stupnice. **Celsiova teplotní stupnice**, kterou znáte z denní praxe, a fyzikálně významná **termodynamická (Kelvinova) teplotní stupnice**. Naučíte se převádět hodnoty mezi těmito stupnicemi.

Zvládnutí této kapitoly je nezbytné pro pochopení následujících kapitol.

6) Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin

V této kapitole se seznámíte s tím, jak se mění rozměry pevných a kapalných těles v závislosti na teplotě. Změnu lineárních rozměrů pevných látek v závislosti na teplotě charakterizuje **teplotní součinitel délkové roztažnosti**, změnu jejich objemu **teplotní součinitel objemové roztažnosti**. Zjistíte, jak spolu tyto součinitele souvisí. Připomenete si, kde se teplotní roztažnost pevných látek projevuje.

Podobně změnu objemu kapalin v závislosti na teplotě lze vyjádřit pomocí **teplotního součinitele objemové roztažnosti** kapaliny. Dále v této kapitole naleznete vysvětlení pojmu **anomálie vody**, který označuje zvláštní závislost objemu vody na teplotě v oblasti mírně nad 0°C.

Naučíte se vyhledat teplotní součinitele roztažnosti pevných látek a kapalin v tabulkách a využít je při řešení úloh.

Zvládnutí této kapitoly není nezbytné pro pochopení následujících kapitol, v případě potřeby ji lze bez problémů přeskočit.

7) Termodynamická soustava. Vnitřní energie, práce, teplo

V této kapitole jsou definovány základní pojmy z termodynamiky jako **izolovaná, neizolovaná, uzavřená, otevřená a adiabaticky izolovaná soustava.** Je zde vysvětleno, co je to **rovnovážný stav**, co jsou **stavové veličiny** a které veličiny mezi ně nepatří.

Dále je definována veličina nazvaná **vnitřní energie**. Naleznete zde příklady, jak lze vnitřní energii měnit konáním práce nebo tepelnou výměnou, případně oběma procesy současně, a formulaci zákona zachování energie pro termodynamickou soustavu – ***první termodynamický zákon***. Naučíte se řešit jednoduché úlohy využívající tohoto zákona.

Zvládnutí této kapitoly je nezbytné pro pochopení další látky.

8) Látka jako soustava částic

Až dosud jsme se na látku a studovaná tělesa dívali víceméně z makroskopického hlediska, nezabývali jsme se jejich vnitřní strukturou. Pro lepší pochopení jejích vlastností se v této a následující kapitole podíváme na látku jako na soubor jednotlivých částic, z hlediska její **diskrétní struktury**. Nejprve se dozvíte, jak se z hlediska vnitřní struktury liší jednotlivá **skupenství** látek.

Pak se seznámíte s veličinou nazvanou **atomová hmotnostní konstanta** a **atomovou (molekulovou) relativní hmotností**, naučíte se vyhledat atomové relativní hmotnosti prvků v tabulkách a vypočítat pomocí nich klidovou hmotnost určitého atomu nebo molekuly.

Dále se dozvíte, co je to **Avogadrova konstanta** a **látkové množství** a jak lze vypočítat, kolik částic je obsaženo v daném látkovém množství látky. Naučíte se definovat **molární hmotnost** a **molární objem** a vypočítat pomocí nich hmotnost a objem určitého látkového množství dané látky.

Zvládnutí této kapitoly je užitečné pro pochopení následujících kapitol.

9) Ideální plyn, stavová rovnice

Tato kapitola se podrobněji věnuje ideálnímu plynu a modelovým termodynamickým dějům, které v něm mohou probíhat. Nejprve si zde zopakujete, co rozumíme **ideálním plynem** a jaké má vlastnosti, a to i z mikroskopického hlediska. Následující text by vám měl alespoň kvalitativně přiblížit souvislost již dříve definovaných makroskopických veličin **teplota**, **vnitřní energie** a **tlak** s chováním souboru molekul, které plynné těleso tvoří.

Seznámíte se se ***stavovou rovnicí ideálního plynu***, která udává vztah mezi stavovými veličinami tlakem, objemem a teplotou určitého množství plynu. Na závěr se naučíte vyjádřit stavovou rovnici a zakreslit **p-V diagram** pro termodynamické děje, při nichž je jedna z těchto veličin konstantní: **děj izobarický, izochorický a izotermický**. Zvládnete pak i řešit jednoduché problémy využitím stavové rovnice ideálního plynu.

Prostudování této kapitoly je potřebné pro pochopení kapitoly následující.

10) Tepelná kapacita

V této kapitole se dozvíte více o procesu tepelné výměny mezi tělesy a souvislosti změny teploty tělesa s množstvím tepla tělesem přijatého nebo odevzdaného. Naleznete zde definice **tepelné kapacity**, **měrné tepelné kapacity** a **molární tepelné kapacity** a vysvětlení rozdílu mezi **izochorickou a izobarickou tepelnou kapacitou**.

Naučíte se vyhledat měrné tepelné kapacity různých látek v tabulkách a pro konkrétní případy, kdy nedochází ke změně skupenství, sestavit a vyřešit ***kalorimetrickou rovnici***.

Zvládnutí této kapitoly je potřebné pro řešení úloh kapitoly následující.

11) Změny skupenství látek

Poslední kapitola druhého modulu se věnuje procesům, při nichž dochází také ke změně skupenství. Naučíte se pojmenovat přechody mezi jednotlivými skupenstvími: **tání, tuhnutí, sublimace, desublimace, vypařování, kapalnění (kondenzace)**. Přechod mezi skupenstvím pevným a kapalným charakterizují tzv. **normální teplota tání** a **měrné skupenské teplo tání**. Pro popis přechodu mezi skupenstvím kapalným a plynným je užitečné znát pojem **var**, závislost teploty varu na tlaku a veličiny **měrné skupenské teplo varu** a **měrné skupenské teplo vypařování**. Analogicky pro přechod mezi skupenstvím pevným a plynným je definováno **měrné skupenské teplo sublimace**.

V této kapitole se také naučíte vyhledat potřebné materiálové charakteristiky v tabulkách a sestavit a vyřešit ***kalorimetrickou rovnici*** i pro děje, při nichž dochází ke změně skupenství.

12) Přenos tepla

Poslední kapitola druhého modulu se věnuje mechanismům tepelné výměny mezi tělesy. Naučíte se rozlišovat mezi třemi typy tepelné výměny: **vedením, prouděním a sáláním** a seznámíte se s základními zákonitostmi určujícími intenzitu takového přenosu. Formou několika praktických příkladů ze stavebnictví se naučíte pracovat s charakteristikami materiálů a stavebních prvků, jako jsou **součinitel tepelné vodivosti, součinitel přestupu tepla, součinitel prostupu tepla, tepelný odpor**. Tato problematika je dnes velmi aktuální v souvislosti s rostoucími nároky na energetickou úspornost budov (požadovanou jak z ekonomického, tak i z ekologického hlediska), ale uvedené postupy řešení lze aplikovat v technické praxi i obecněji.

2.1 Tekutiny. Tlak

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. vysvětlit, co označuje pojem tekutiny a jaké jsou společné a naopak rozdílné vlastnosti kapalin a plynů
2. charakterizovat ideální kapalinu a ideální plyn
3. definovat slovně i vzorcem veličinu zvanou tlak a její jednotku
4. vysvětlit slovně i vzorcem princip fungování hydraulického (pneumatického) zařízení
5. řešit jednoduché úlohy využívající Pascalova zákona

45 minut

Síla.

Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

Názvem tekutiny rozumíme tělesa, která nemají stálý tvar a přizpůsobují se tvaru nádoby, v níž se nacházejí. Toto chování je důsledkem toho, že částice, z nichž se tekutiny skládají, se na rozdíl od částic v pevných látkách mohou vůči sobě snadno pohybovat. Ideální tekutina je dokonale tekutá, bez vnitřního tření. Reálné tekutiny mají různě velké vnitřní tření (viskozitu), což se projeví jejich různou tekutostí, například rostlinný olej se roztéká pomaleji než voda.

Tekutiny zahrnují kapaliny a plyny.

Kapalná tělesa snadno mění svůj tvar, ale zachovávají si stálý objem. Ideální kapalinou rozumíme těleso, které je dokonale tekuté a zcela nestlačitelné.

Plynná tělesa snadno mění svůj tvar i objem podle tvaru nádoby, v níž se nacházejí. Ideální plyn je dokonale tekutý a dokonale stlačitelný.

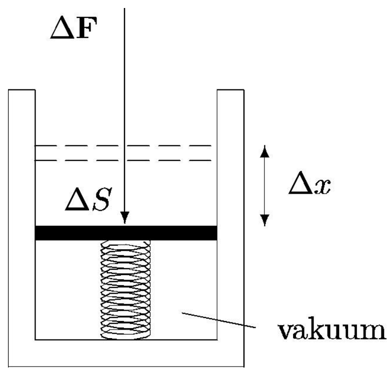
Věnujme se dále tekutinám v klidu. Síla, jíž ideální tekutina působí na libovolnou plošku v ní ponořenou, je vždy kolmá k povrchu plošky (nemá žádné tečné složky). Tuto sílu nazýváme tlakovou silou. Její velikost může záviset na tom, v jakém místě se ploška nachází. Pro popis tekutin v klidu je proto výhodné zavést novou fyzikální veličinu, nazvanou tlak.

Tlak p je podíl velikosti tlakové síly ΔF a obsahu plošky ΔS, na kterou tato síla v kolmém směru působí, tedy

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

Tlak je skalární veličina. Základní jednotkou tlaku je pascal, značka Pa. Odpovídá tlaku, který vyvolá síla o velikosti 1 N působící kolmo na plochu 1 m^2. Často používanou násobnou jednotkou je kilopascal - kPa, například normální atmosférický tlak má hodnotu 101,325 kPa.

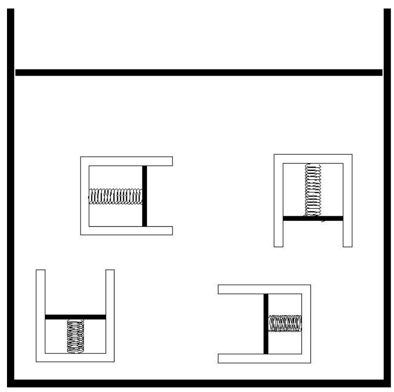
K měření tlaku bychom mohli použít například idealizované tlakové čidlo, zachycené na obrázku, viz. obr. 2.1-1.



Obr. 2.1-1.

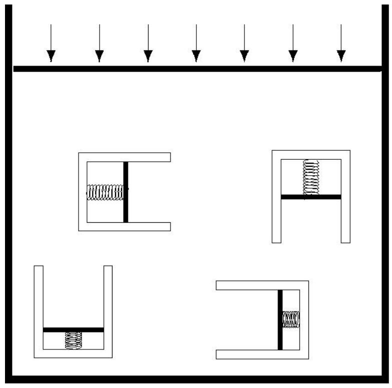
Tlakové čidlo měří tlak pomocí zasunutí dobře utěsněného pístu opřeného o pružinu umístěnou ve vakuu v pevné malé nádobce. Čím větší bude tlak v daném místě tekutiny, tím větší bude stlačení pružiny Δx. Budeme-li v daném bodě tekutiny v klidu čidlo libovolně natáčet, zjistíme, že stlačení pružiny se nemění. Hodnota tlaku nezávisí na orientaci plošky pístu, kolmá síla působící na píst je při libovolném natočení plošky stejně velká.

Mějme nyní tekutinu uzavřenou v nádobě s pohyblivým pístem. Do různých míst v nádobě upevníme několik tlakových čidel a zaznamenáme hodnoty tlaku, které ukazují, viz. obr. 2.1-2.



Obr. 2.1-2

Nyní zatlačíme na píst a odečteme nové hodnoty tlaku detekované čidly. Viz. obr. 2.1-3.

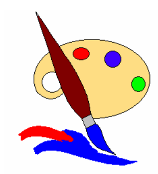


Obr. 2.1-3

Porovnáním obou skupin údajů zjistíme, že tlak vzrostl ve všech bodech tekutiny o stejnou hodnotu. Tuto vlastnost tekutin vyjadřuje Pascalův zákon:

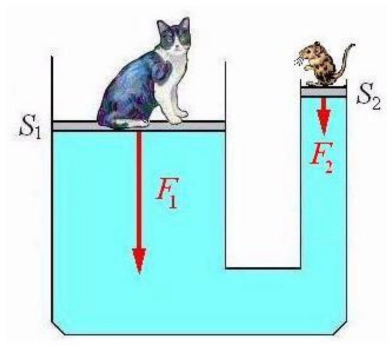
Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na tekutinu v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný.

Platnosti tohoto zákona v praxi využívají hydraulická (naplněná kapalinou) a pneumatická (plněná vzduchem) zařízení. Jejich princip si prostudujte pomocí následujícího ilustračního příkladu (pro jednoduchost zde prozatím zanedbáme hydrostatický tlak, se kterým se blíže seznámíte v následující kapitole) .



Princip hydraulického zvedáku

Na obrázku vidíte zjednodušený model hydraulického zvedáku. Je tvořen spojenými nádobami s kapalinou uzavřenou těsnícími, ale lehce pohyblivými různě velkými písty. Není-li ani jeden píst zatížen, je soustava v rovnováze a písty se nepohybují.



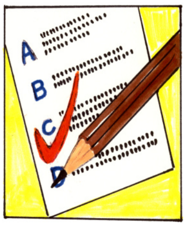
Zatížíme-li jeden z pístů, rovnováha se poruší a tento píst začne klesat, současně bude druhý píst stoupat (kapalina je nestlačitelná). Abychom uvedli systém opět do rovnováhy, musíme zatížit i druhý píst. Jak je možné, že k opětovnému ustavení rovnováhy stačí zatížit menší píst menší silou?

Je to důsledek Pascalova zákona: tlak vyvolaný vnější silou, která působí na tekutinu v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný. Proto (zanedbáme-li zatím hydrostatický tlak) je stejný tlak kapaliny na oba písty:

$$p_1 = p_2.$$

Nyní využijeme ještě definici tlaku $p=F/S$, pak již dostaneme výsledný vztah po poměr tlakových sil na písty.

Z Pascalova zákona pro síly, jimiž působí kapalina na písty hydraulického (pneumatického) zařízení, plyne: $\dfrac{F_2}{F_1} = \dfrac{S_2}{S_1}$.

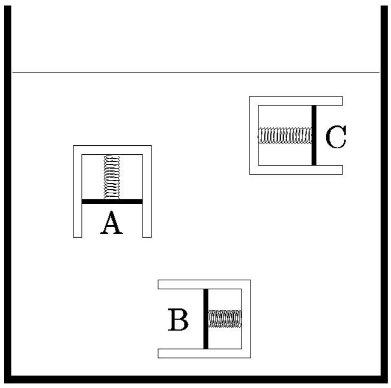


KO2.1-1. Rozhodněte, která tvrzení jsou správná. Pojem tekutiny
a) je synonymem pojmu kapaliny
b) označuje kapaliny bez vnitřního tření (viskozity)
c) zahrnuje kapaliny a plyny
d) označuje tělesa, která nemají stálý objem
e) označuje tělesa, která nemají stálý tvar a přizpůsobují jej tvaru nádoby

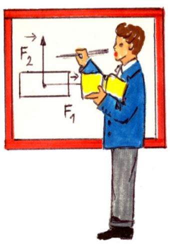
KO2.1-2. Rozhodněte, které tvrzení je správné. Fyzikální veličina tlak je
a) vektor stejné orientace jako tlaková síla, tj. kolmý k libovolné ploše
b) vektor stejné orientace jako síla, která jej vyvolala (např. stlačující píst)
c) vektor orientovaný proti síle, která jej vyvolala
d) skalár

KO2.1-3. Jako jednotkou tlaku lze použít
a) $\mathrm{N\,m^{2}}$
b) Pa
c) N
d) $\mathrm{kg\,m^{-1}\,s^{-2}}$
e) $\mathrm{N\,cm^{-2}}$

KO2.1-4. V kapalině na obrázku 2.1-4 jsou upevněna tři tlaková čidla. Na počátku čidlo A ukazuje hodnotu 10 Pa, čidlo B 12 Pa a čidlo C 8 Pa. Pak kapalinu stlačíme tak, že čidlo A bude ukazovat hodnotu p_A = 12 Pa. Jaké hodnoty ukáží další čidla?



obr. 2.1-4



Písty hydraulického zařízení mají kruhové průřezy, průměr menšího z nich je $d_1 = 5\,\mathrm{cm}$, průměr většího $d_2 = 20\,\mathrm{cm}$. Jak velkou silou bude působit kapalina na větší píst, zatlačíme-li na menší silou $F_1 = 100\,\mathrm{N}$? Jak velký tlak p tato síla v kapalině vyvolá? Vliv tíhového pole neuvažujte.

Řešení:

Z definice tlaku plyne, že $p = \dfrac{F_1}{S_1}$. Písty jsou kruhového průřezu, plocha prvního je tedy $S_1 = \dfrac{\pi d_1^2}{4}$. Celkově dostaneme

$$p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{4\,F_1}{\pi\, d_1^2} = \frac{4 \cdot 100}{3{,}14 \cdot 0{,}05^2}\ \mathrm{Pa} = 51\,\mathrm{kPa}\,.$$

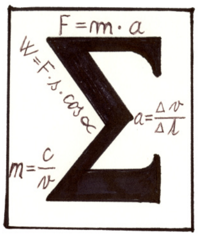
Tento tlak je podle Pascalova zákona ve všech místech kapaliny stejný, na velký píst bude tedy působit síla o velikosti

$$F_2 = p \cdot S_2 = \frac{F_1}{S_1} S_2 = \frac{F_1 \cdot d_2^2}{d_1^2} = \frac{100 \cdot 0{,}2^2}{0{,}05^2}\ \mathrm{N} = 1600\ \mathrm{N}\,.$$

U2.1-5. Jak velký tlak vyvolá v kapalině síla o velikosti F = 100 N, působící kolmo na píst o ploše $S = 15\,\mathrm{cm}^2$?

U2.1-6. Jaký musí být poměr ploch většího ku menšímu pístu pneumatického zvedáku, má-li na menší píst působit síla maximálně 200 N a zvedaná břemena dosahují hmotnosti až 1 tuny?

Nyní stručně shrňte nejdůležitější body této kapitoly. Nevíte-li si rady, připomeňte si nejprve studijní cíle stanovené v úvodu.



Tekutiny jsou tělesa, která nemají stálý tvar, zahrnují kapaliny a plyny.

Ideální kapalina je dokonale tekutá a nestlačitelná. Ideální plyn je dokonale tekutý a stlačitelný.

Síla, jíž ideální tekutina působí na libovolnou plošku, je vždy kolmá k povrchu plošky a nezáleží na natočení plošky.
Skalární veličina tlak je definována jako podíl této síly a velikosti dané plošky, $p = \Delta F/\Delta S$, základní jednotkou tlaku je pascal, značka Pa.

Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na tekutinu v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný (Pascalův zákon). Toho využívají hydraulická a pneumatická zařízení. Pro síly, jimiž působí kapalina na písty zařízení, odtud plyne: $F_2/F_1 = S_2/S_1$.

2.2 Hydrostatický a atmosférický tlak. Vztlaková síla

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

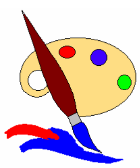
1. vysvětlit, co je to atmosférický tlak a znát přibližnou hodnotu normálního atmosférického tlaku
2. popsat, jaké je rozložení tlaku v kapalině nacházející se v klidu v tíhovém poli
3. popsat princip rtuťového barometru a otevřeného manometru
4. vysvětlit, proč na tělesa ponořená v kapalině působí vztlaková síla, určit její velikost
5. rozhodnout, která tělesa při ponoření do vody budou plovat na její hladině a která se potopí
6. řešit jednoduché úlohy využívající Archimedova zákona

120 minut

Síla, tíhová síla, tlak , hustota látky

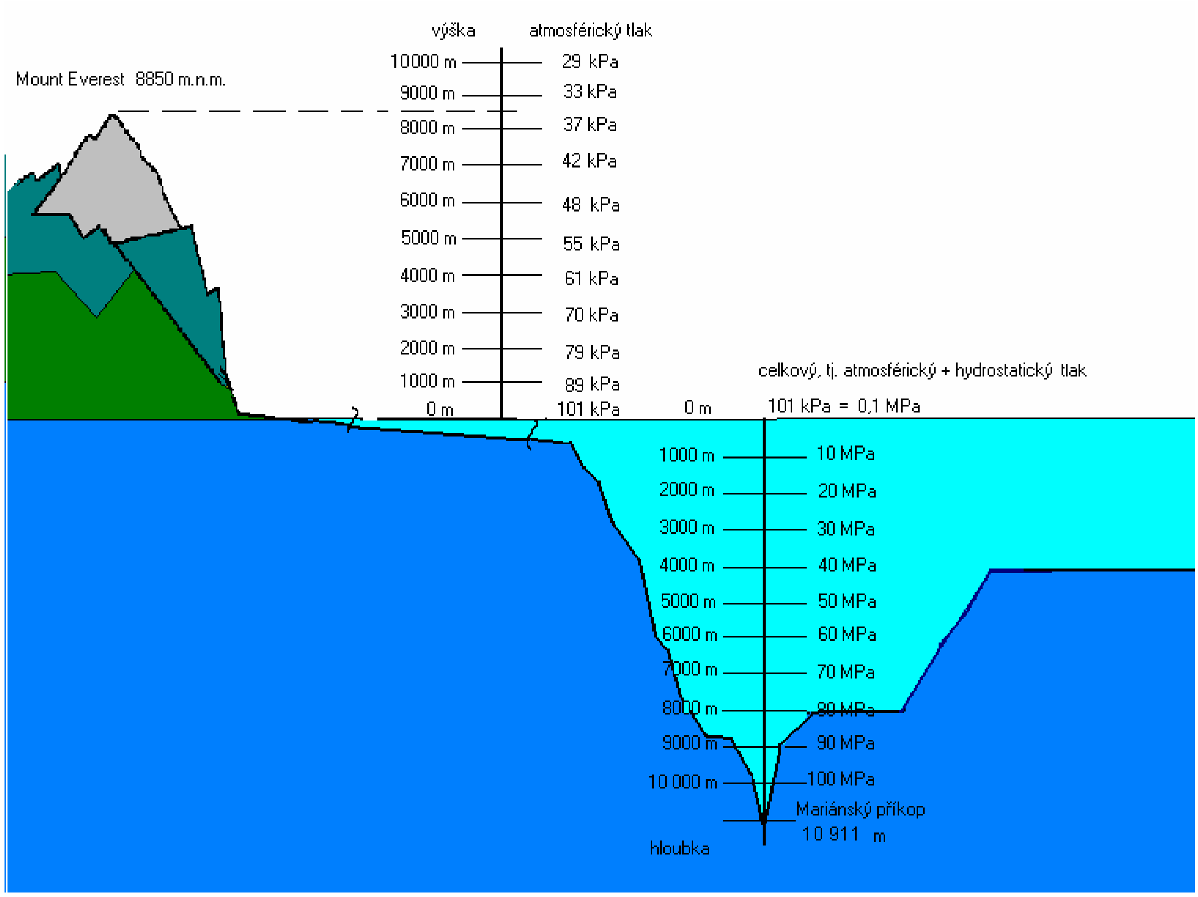
Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

V předchozí kapitole jste se seznámili s veličinou zvanou tlak. Z vlastní zkušenosti pravděpodobně víte, že budete-li se potápět pod vodní hladinu, ve větší hloubce na vás bude voda působit větším tlakem. Vezmete-li si s sebou při potápění měřič tlaku, třeba čidlo, s nímž jste se seznámili v předchozí kapitole, zjistíte, že tlak roste lineárně s hloubkou. Tento tlak je vyvolán existencí tíhového pole Země a nazývá se hydrostatický tlak. Podobně v atmosféře Země jsme ponořeni v plynném tělese (vzduchu), budeme-li stoupat vzhůru, bude tlak, nazývaný v tomto případě atmosférický tlak, klesat. Tento pokles ale bude mnohem pomalejší než ve vodě a nebude lineární, protože vzduch v atmosféře má mnohem menší hustotu než voda a hustota vzduchu s výškou klesá. Aktuální hodnota atmosférického tlaku se mění také v souvislosti s počasím. Hodnota tzv. normálního atmosférického tlaku při hladině moře je $p_a = 101{,}325\ \mathrm{kPa}$.



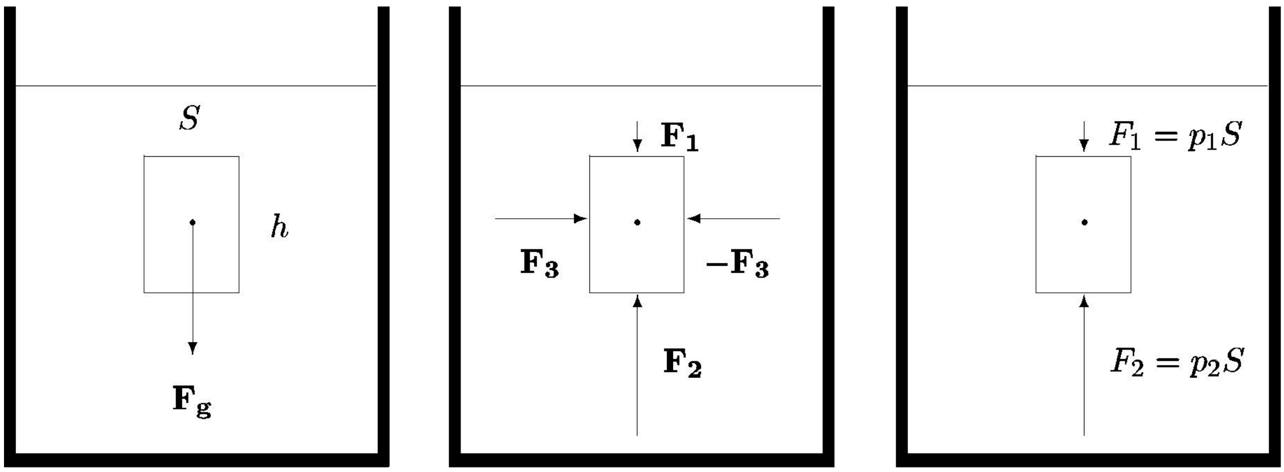
Atmosférický a hydrostatický tlak

Průběh atmosférického tlaku nad zemským povrchem a nárůst hydrostatického tlaku pod mořskou hladinou je zachycen na následujícím obrázku.



Podívejme se nyní blíže na to, proč hydrostatický tlak vzniká a na čem závisí. Následující odvození si nemusíte pamatovat, ale snažte se je pochopit.

Mějme nádobu s vodou (kterou budeme považovat za ideální kapalinu), stojící v klidu na stole. Ve vodě si vybereme určitý vzorek, pro jednoduchost například tvaru kvádru s vodorovnými podstavami a svislými stěnami (viz obrázek) o obsahu podstavy S a výšce h, s objemem $V = S \cdot h$. Viz. obr. 2.2-1.



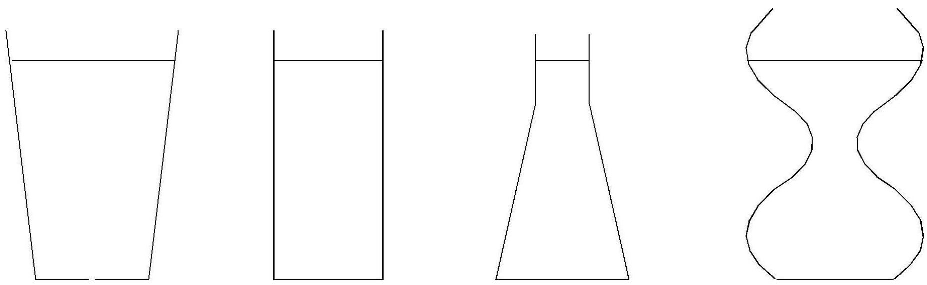
obr. 2.2-1

Protože se kvádr nachází v tíhovém poli Země, působí na něj směrem dolů tíhová síla o velikosti $F_g = m \cdot g$, kde m je hmotnost krychle a g tíhové zrychlení. Tuto sílu můžeme také rozepsat jako

$F_g = \rho V g = \rho S h g$, kde ρ je hustota vody. Zvolený kvádr je v klidu, proto výsledná síla, která na něj působí, musí být nulová. Okolní kapalina tedy musí na kvádr působit celkově stejně velkou silou, jako je síla tíhová, ale orientovanou směrem vzhůru - silou vztlakovou. Z předchozí kapitoly víme, že tlakové síly jsou vždy kolmé k ploše, na niž působí. Síly působící na protilehlé stěny kvádru se tedy musí navzájem vykompenzovat a tlaková síla působící na dolní podstavu kvádru musí být o F_g větší než tlaková síla působící na podstavu horní. Tlakové síly působící na jednotlivé podstavy vypočteme jako $F_1 = p_1 S$ a $F_2 = p_2 S$. Pro vztlakovou sílu tedy musí platit $F_2 - F_1 = (p_2 - p_1)S = F_g = h\rho g S$, odkud plyne, že $p_2 = p_1 + h\rho g$. V úrovni volné hladiny kapaliny je celkový tlak roven tlaku atmosférickému p_a a hydrostatický tlak je zde nulový. V hloubce h kapaliny o hustotě ρ bude celkový tlak větší o hydrostatický tlak $p_h = h\rho g$.

Hydrostatický tlak v hloubce h kapaliny o hustotě ρ nacházející se v tíhovém poli o tíhovém zrychlení g je $p_h = h\rho g$.

Hydrostatický tlak v hloubce *h* kapaliny nezávisí na tvaru nádoby, v níž se kapalina nachází. Na následujícím obrázku je zachyceno několik nádob různého tvaru, naplněných stejnou kapalinou. Viz. obr. 2.2-2.

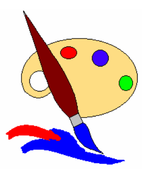


obr. 2.2-2

Tlak v hloubce h pod volným povrchem kapaliny bude ve všech nádobách stejný (to je tzv. hydrostatické paradoxon).

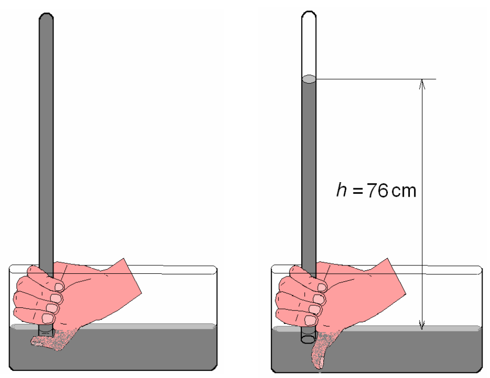
Existence hydrostatického tlaku lze využít k měření tlaku například rtuťovým barometrem nebo otevřeným kapalinovým manometrem.

Pomocí zařízení uspořádaného na principu, jehož dodnes využívají přesné rtuťové barometry, určil hodnotu atmosférického tlaku G. E. Torricelli již roku 1643.



Torricelliho pokus – určení atmosférického tlaku

1. otevřenou nádobu částečně naplníme rtutí
2. Torricelliho trubici, tj. dostatečně dlouhou na jednom konci uzavřenou trubici naplníme rtutí až po okraj
3. otevřené hrdlo dočasně uzavřeme prstem nebo zátkou
4. trubici obrátíme a její dolní konec ponoříme do nádoby se rtutí

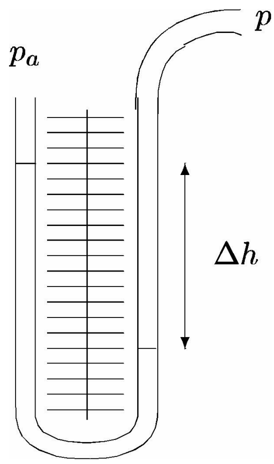


5. ponořený konec trubice uvolníme - z hrdla začne rtuť vytékat a její hladina se zastaví asi ve výšce 76 cm nad úrovní okolní volné hladiny.

Do vyprázdněného prostoru na horním konci trubice nemohl proniknout vzduch, vznikne zde tzv. Torricelliho vakuum. Ve vakuu je tlak nulový, tlak v určitém bodě níže v trubici je roven hydrostatickému tlaku rtuťového sloupce nad ním. V úrovni volné hladiny musí být v ustáleném stavu tlak roven tlaku atmosférickému. Pohyb rtuti se tedy zastaví, až hydrostatický tlak sloupce kapaliny v trubici nad úrovní okolní volné hladiny bude roven atmosférickému tlaku. Známe-li hustotu rtuti, tíhové zrychlení a výšku rtuťového sloupce, můžeme hodnotu atmosférického tlaku vypočítat:

$p_a = h\rho g = 101{,}3\,\mathrm{kPa}$

Na následujícím obrázku 2.2-4 je zachycen otevřený kapalinový manometr, který slouží k měření přetlaku nebo podtlaku v nádobě.



obr. 2.2-4

Jedno jeho rameno je otevřené a tlak v úrovni hladiny kapaliny je zde tedy roven tlaku atmosférickému p_a, druhý konec je napojen na měřenou nádobu, tlak v úrovni hladiny v tomto rameni je roven tlaku v nádobě p. Z rozdílu výšek obou hladin můžeme vypočítat rozdíl těchto tlaků: $p - p_a = \Delta h \rho g$.

Podívejme se nyní, jakou silou působí tekutina na jiné těleso, které je do ní ponořeno.

Vraťme se opět k úvodnímu obrázku 2.2-1 odvození vztahu pro hydrostatický tlak a představme si, že místo vody vyplníme zvolený kvádr jinou látkou, třeba dřevem nebo ocelí.

Okolní voda na něj bude působit stejnou vztlakovou silou, jako původně působila na tentýž kvádr tvořený vodou. Velikost vztlakové síly je tedy rovna tíze vody obsažené ve zvoleném kvádru. Tuto vlastnost pro tekutiny obecně vyjadřuje Archimedův zákon:

Těleso ponořené do tekutiny je nadlehčováno silou, jejíž velikost je rovna tíze tekutiny o stejném objemu, jako je objem ponořené části tělesa,

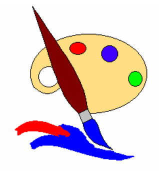
$$F_{vz} = V\rho g\,,$$

kde V je objem ponořené části tělesa a ρ hustota tekutiny.

Je zřejmé, že je-li průměrná hustota ponořeného tělesa větší než hustota tekutiny, je vztlaková síla menší než tíhová síla působící na těleso a to bude klesat ke dnu. Naopak tělesa o menší hustotě než hustota tekutiny v ní budou stoupat. Je-li tekutinou kapalina ohraničená volnou hladinou, takové těleso se ustálí v poloze částečně nad hladinou tak, aby tíhová a vztlaková síla byly v rovnováze.

Tělesa o hustotě shodné s hustotou tekutiny v ní mohou zcela ponořená setrvat v klidu v libovolné hloubce.

Díky existenci vztlakové síly mohou plout lodě i jiná tělesa po vodě, létat pouťové balónky a horkovzdušné balony. Na tomto principu pracují také hustoměry.

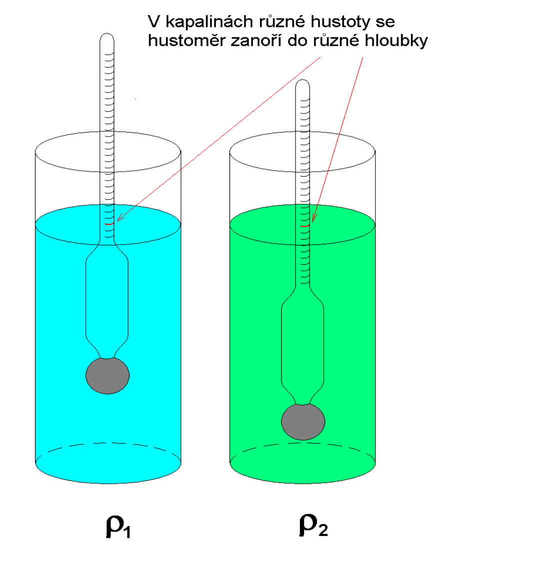


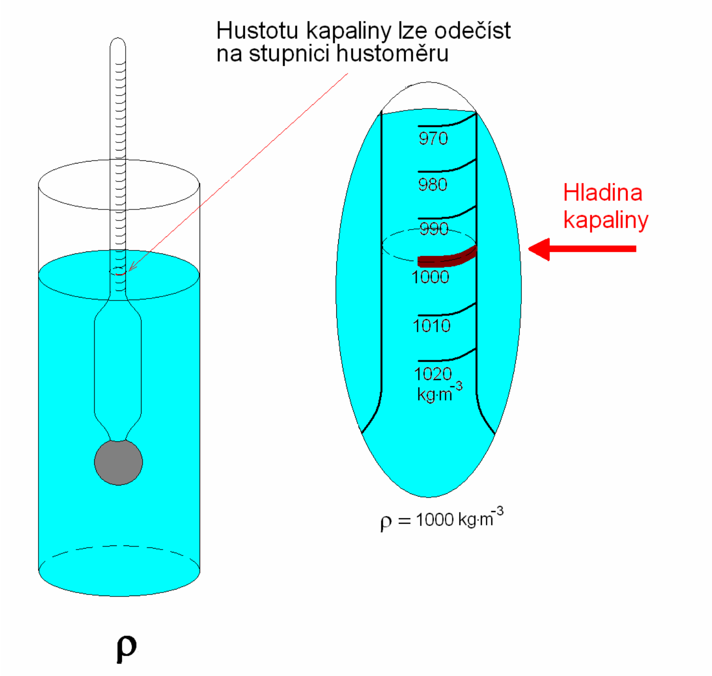
Princip hustoměru

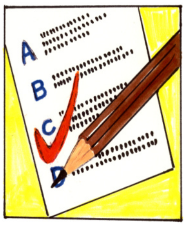
Hustoměr je jednoduché zařízení založené na principu Archimedova zákona. Je to skleněná zatavená trubice zatížená na dolním konci, horní část je tvořena kalibrovanou trubičkou, na níž lze přímo odečítat naměřenou hustotu.

Tíhová síla působící na hustoměr částečně ponořený do kapaliny je kompenzována vztlakovou silou kapaliny. U hustší kapaliny k vyvolání stejně velké vztlakové síly stačí menší objem ponořené části hustoměru: $F_G = F_{vz} = \rho_1 V_1 g = \rho_2 V_2 g$.

V případě našeho obrázku tedy musí platit $\rho_1 > \rho_2$.

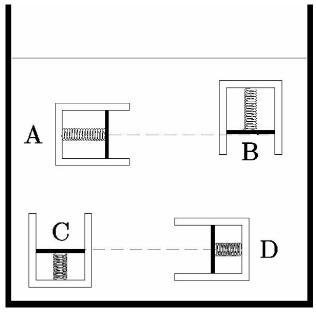




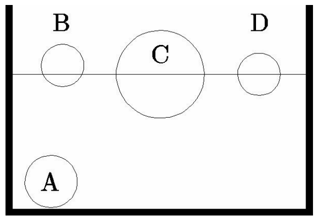


KO2.2-1. Hydrostatický tlak u dna nádoby s kapalinou závisí na
a) hustotě kapaliny
b) ploše dna
c) tvaru nádoby
d) výšce kapaliny v nádobě
e) tíhovém zrychlení
f) celkovém objemu kapaliny

KO2.2-2. Normální atmosférický tlak u hladiny moře je asi
a) 100 Pa
b) 1000 Pa
c) 100 kPa
d) 100 MPa



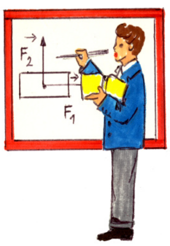
KO2.2-3. Seřaďte výsledné tlakové síly, kterými působí kapalina na písty různě umístěných a orientovaných, ale jinak stejných tlakových čidel od nejmenší po největší za pomoci znamének = a <.



KO2.2-4. Na obrázku je několik koulí z různých materiálů nacházejících se v klidu v kapalině. Seřaďte hustoty kapaliny a koulí v ní ponořených od největší po nejmenší za pomoci znamének = a >.

KO2.2-5. Ve vědru s vodou stojícím na Zemi volně plove bójka a nad hladinu vyčnívá 30% jejího objemu. Jak se tato hodnota změní (vzroste, poklesne, nezmění se), umístíme-li celý systém na Měsíc?

KO2.2-6. Člun, ve kterém volně leží záchranný kruh a železná kotva, pluje v bazénu, který je jen trochu větší než člun samotný.
Popište, co se stane s hladinou vody v bazénu (vzroste, poklesne, nezmění se) v následujících případech:
1) kotvu vhodíme do vody
2) kotvu vyložíme na břeh
3) záchranný kruh vhodíme do vody
4) záchranný kruh vyložíme na břeh



V nádobě s vodou plove kus ledu. Jaká část jeho objemu vyčnívá nad hladinu? Jak se změní výška hladiny vody v nádobě poté, co led roztaje? Hustota ledu je $\rho_L = 900\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$, hustota vody $\rho = 1000\,\mathrm{kg\,m^{-3}}$.
Řešení:

Na led působí směrem dolů tíhová síla F_G, směrem vzhůru vztlaková síla F_{vz}. Protože je led v klidu, musí být výsledná síla, která na něj působí, nulová a tedy $F_G = F_{vz}$. Označme objem ponořené části ledu *V*, objem celého ledu V_L. Pak platí $F_G = \rho_L V_L g$, $F_{vz} = \rho V g$. Tedy

$$\rho_L V_L g = \rho V g \quad \Rightarrow \quad V = \frac{\rho_L}{\rho} V_L = \frac{900}{1000} V_L = \frac{9}{10} V_L .$$

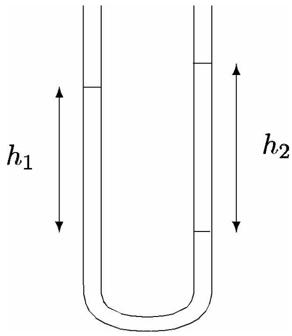
Nad hladinu vyčnívá objem

$$\Delta V = V_{\mathrm{L}} - V = V_{\mathrm{L}} - \frac{9}{10} V_{\mathrm{L}} = \frac{1}{10} V_{\mathrm{L}} \,.$$

Nad hladinu vyčnívá $\frac{1}{10}$ objemu ledové kostky. Na druhou část otázky lze odpovědět i bez výpočtu. Podle Archimedova zákona byla vztlaková síla a tedy i tíha ledu rovna tíze vody stejného objemu, jako je objem ponořené části ledu *V*. Tíha vody, která původně tvořila ledovou kostku, se roztáním nezmění. Roztáním ledu tedy vznikne voda objemu *V* a výška hladiny vody v nádobě zůstane stejná.

U2.2-7. Jaký je hydrostatický tlak na dně Mariánského příkopu? Dosud nejhlubší změřený bod leží 10,911 km pod mořskou hladinou, hustota mořské vody je přibližně $\rho \doteq 1020\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$, tíhové zrychlení $g = 9{,}81\,\mathrm{m \cdot s^{-2}}$.

U2.2-8. V U-trubici jako na obrázku 2.2-7 je voda a olej. Hladina vody je ve výšce $h_1 = 9{,}3\,\mathrm{cm}$, hladina oleje ve výšce $h_2 = 10\,\mathrm{cm}$ nad společným rozhraním. Jaká je hustota oleje?

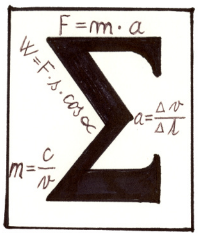


obr. 2.2-7

U2.2-9. Dřevěná kláda plove na vodě, přičemž třetina jejího objemu vyčnívá nad hladinu. Jaká je její hustota?

U2.2-10. Nezatížený ponton plove na vodě tak, že vyčnívá nad hladinu do výšky $h_1 = 0{,}6\,\mathrm{m}$. Plocha pontonu je $S = 20\,\mathrm{m}^2$. Jaká je největší možná hmotnost přepravovaného nákladu, nesmí-li voda dosahovat výše než $h_2 = 0{,}1\,\mathrm{m}$ pod okraj pontonu?

Nyní vlastními slovy stručně shrňte nejdůležitější body této kapitoly s ohledem na stanovené studijní cíle.



Atmosférický tlak vzduchu vzniká v důsledku existence tíhového pole Země a s hloubkou narůstá. Hodnota tzv. normálního atmosférického tlaku při hladině moře je asi 100 kPa.

Z téhož důvodu vzniká v kapalinách hydrostatický tlak. Hydrostatický tlak v hloubce h kapaliny o hustotě ρ nacházející se v tíhovém poli o tíhovém zrychlení g je $p_{\mathrm{h}} = h\rho g$. Hydrostatický tlak v hloubce h kapaliny nezávisí na tvaru nádoby, v níž se kapalina nachází.

Měření atmosférického tlaku rtuťovým barometrem je založeno na rovnosti tohoto tlaku a hydrostatického tlaku sloupce rtuti ve vyčerpané uzavřené trubici. Měření přetlaku či podtlaku otevřeným kapalinovým manometrem také využívá vztahu pro hydrostatický tlak, vychází z rozdílu výšky výstupu kapaliny v otevřeném rameni (v úrovni hladiny je zde atmosférický tlak) a v rameni připojeném k nádobě.

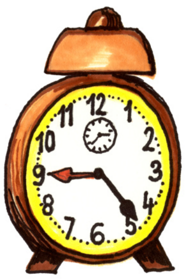
Těleso ponořené do tekutiny je v důsledku závislosti tlaku na hloubce nadlehčováno silou, jejíž velikost je rovna tíze tekutiny o stejném objemu, jako je objem ponořené části tělesa, $F_{\mathrm{vz}} = V\rho g$, (Archimedův zákon).

Je-li vztlaková síla větší nebo rovna síle tíhové, působící na těleso do kapaliny volně vložené, těleso bude v kapalině plovat nebo se vznášet, v opačném případě bude klesat ke dnu.

2.3 Povrchové napětí. Kapilarita

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. uvést alespoň 3 různé příklady, jak se projevuje povrchové napětí
2. definovat slovně i vzorcem veličinu povrchové napětí, určit její jednotku
3. vysvětlit souvislost mezi povrchovým napětím a energií
4. vyhledat hodnoty povrchového napětí v tabulkách a využít je při řešení jednoduchých úloh
5. pro kapalinu v nádobě načrtnout situaci, kdy kapalina smáčí, resp. nesmáčí stěny nádoby
6. vysvětlit, kdy vzniká tzv. kapilární tlak a jak se projeví na celkovém tlaku v určitém bodě uvnitř kapiláry
7. umět na základě vztahu pro kapilární tlak vypočítat, o jakou výšku vystoupí nebo poklesne hladina dané kapaliny v kapiláře o určitém průměru



90 minut

Síla, tlak /2.1/, hydrostatický tlak /2.2/, hustota látky

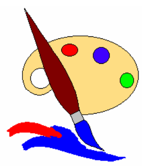
Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

Na obrázku vidíte plovat padesátník na vodě, ačkoli hustota hliníku je větší než hustota vody. Při troše šikovnosti můžete stejně nechat plovat na hladině třeba jehlu nebo žiletku a téhož jevu využívá drobný hmyz, běhající po vodní hladině.

obr. 2.3-1

Je to umožněno existencí povrchového napětí. Díky povrchovému napětí, které vzniká v důsledku interakce molekul v povrchové vrstvě kapaliny s okolními molekulami, se hladina kapaliny chová podobně jako pružná blána.

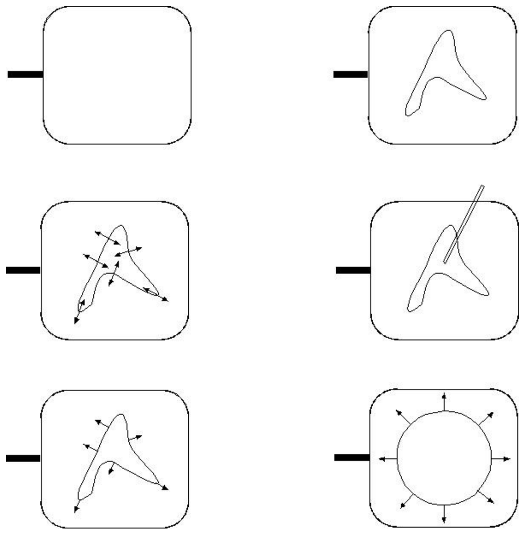
V důsledku existence povrchového napětí také přitahuje tenká vrstva na povrchu kapaliny libovolnou křivku na povrchu kapaliny povrchovými silami. Ty jsou tečné k povrchu a v každém bodě kolmé ke křivce. Lze to demonstrovat následujícím pokusem, který si snadno můžete provést i sami doma.



Směr sil povrchového napětí

Mějme drátěný rámeček, na kterém vytvoříme blánu ze saponátového roztoku. Na ni opatrně vhodíme svázanou nit tak, aby blána nepraskla (pomůže nit předem také namočit v roztoku). Nit zaujme tvar obecné křivky, například jako na obrázku. Protože kapalina obklopuje nit zvenčí i zevnitř křivky, přitažlivé síly povrchového napětí se vzájemně vykompenzují. Pak opatrně porušíme kapalinu uvnitř nitě. Kapalina je teď pouze zvenčí křivky a nit zaujme tvar kružnice. Kapalina napíná nit silami povrchového napětí, které jsou nyní kompenzovány pevností nitě.

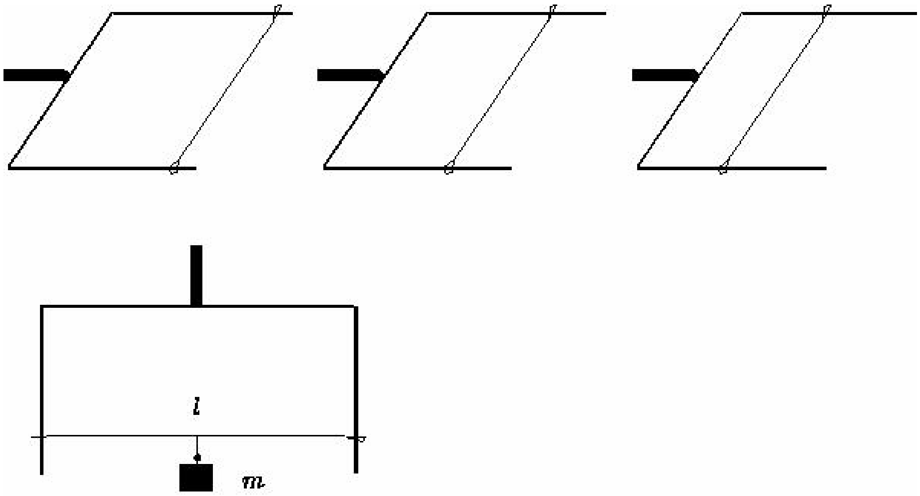
Síly povrchového napětí jsou vždy tečné k povrchu kapaliny a kolmé k libovolné křivce ležící v kapalině.



Velikost síly povrchového napětí

Mějme drátěný rámeček s volně pohyblivou příčkou. Ponořením do saponátového roztoku vytvoříme na rámečku tenkou blánu (má dva povrchy, mezi nimiž je tenká vrstva kapaliny). Budeme-li rámeček držet vodorovně, pozorujeme, že blána se stahuje a v důsledku povrchových sil stahuje i příčku.

Nyní otočíme rámeček svisle a příčku zatížíme takovým závažím, aby zůstala v klidu. Tíha závaží a příčky je nyní rovna až na znaménko síle povrchového napětí kapaliny.



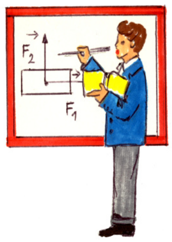
Opakováním pokusu pro rámečky s různou délkou pohyblivé příčky zjistíme, že síla povrchového napětí je přímo úměrná délce příčky. Velikost této síly je pro různé kapaliny různá.

Zavedeme veličinu nazvanou povrchové napětí:

Povrchové napětí σ je rovno podílu velikosti povrchové síly ΔF a délky křivky Δl, na kterou kapalina touto silou působí, $\sigma = \dfrac{\Delta F}{\Delta l}$.

Jednotkou povrchového napětí je Nm^{-1}. Hodnoty povrchového napětí kapalin lze nalézt v tabulkách.

Než postoupíme dále v teoretickém popisu jevů souvisejících s existencí povrchového napětí, prostudujte si následující řešený příklad, který ilustruje také souvislost povrchového napětí s energií povrchové vrstvy kapaliny.



Jak velkou práci musíme vykonat, abychom zvětšili plochu mýdlové blány v rámečku s pohyblivou přepážkou na obrázku 2.3-2 posunutím o $\Delta x = 1\,\mathrm{cm}$? Šířka rámečku je $l = 4\,\mathrm{cm}$, povrchové napětí mýdlového roztoku $\sigma = 40\,\mathrm{mN\,m^{-1}}$.

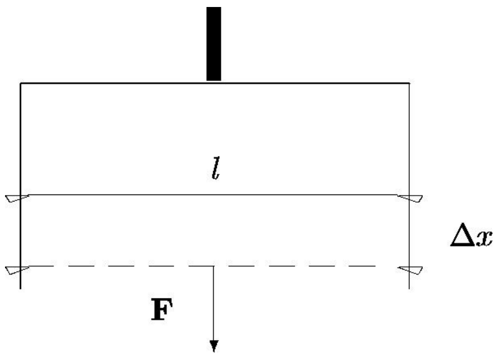
Řešení:

Velikost síly povrchového napětí, kterou působí mýdlová blána na přepážku, je $F = 2l\sigma$, protože blána má dva povrchy. Při posouvání přepážky musíme působit stejně velkou silou opačného směru. Práce vykonaná silou o velikosti F působící ve směru posunu o velikosti Δx je dána vztahem $W = F\Delta x$, celkově tedy

$$W = F\Delta x = 2l\sigma\Delta x = 2\cdot 4\cdot 10^{-2}\cdot 40\cdot 10^{-3}\cdot 1\cdot 10^{-2}\ \mathrm{J} = 3{,}2\cdot 10^{-5}\ \mathrm{J}.$$

Poznámka: Tato úloha ilustruje další význam veličiny povrchového napětí. Vykonáním práce W jsme zvětšili povrchovou energii o $\Delta E = W = 2l\sigma\Delta x$ a plochu povrchu mýdlové blány o $\Delta S = 2l\Delta x$. Odtud $\sigma = \dfrac{\Delta E}{\Delta S}$.

Povrchové napětí tedy také odpovídá plošné hustotě povrchové energie. Viz. obr. 2.3-2.

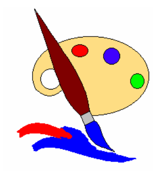


obr. 2.3-2

Povrchové napětí odpovídá plošné hustotě povrchové energie: $\sigma = \dfrac{\Delta E}{\Delta S}$.

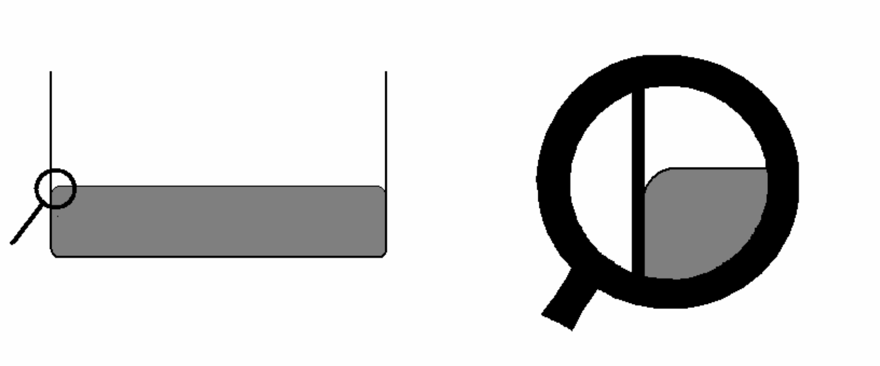
Nyní se blíže podívejme na to, jak se bude chovat povrch kapaliny na rozhraní tří prostředí: kapalina – pevná látka – plyn. Na molekuly kapaliny na tomto rozhraní silově působí molekuly všech tří prostředí. V závislosti na výslednici těchto sil kapalina buď smáčí stěnu nádoby, nesmáčí stěnu nádoby nebo její povrch zůstane rovný.

Vložíme-li do kapaliny tenkou trubičku (kapiláru), kterou kapalina nesmáčí, úroveň hladiny kapaliny v trubičce poklesne oproti úrovni okolní hladiny. Tento jev se nazývá kapilární deprese. Vložíme-li do kapaliny naopak kapiláru, kterou kapalina smáčí, úroveň hladiny kapaliny v trubičce se oproti úrovni okolní hladiny zvýší. Tento jev se nazývá kapilární elevace.

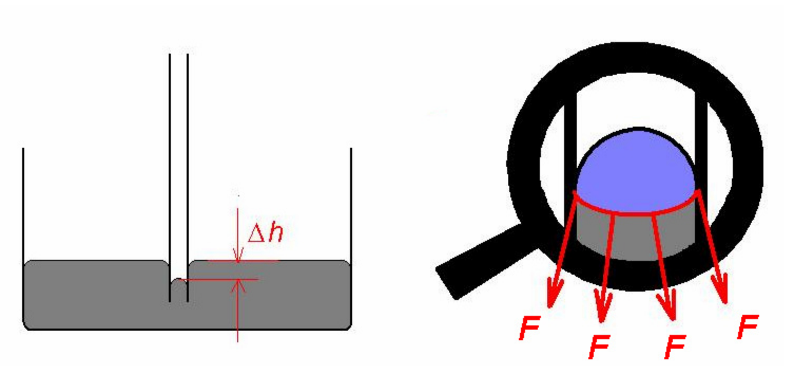


Kapilární deprese

Kapalinou, která nádobu nesmáčí, je například rtuť ve skleněné nádobě, je-li nad hladinou vzduch. Rozhraní rtuť-sklo-vzduch bude vypadat jako na průřezu na obrázku.



Ponoříme-li do nádoby se rtutí tenkou skleněnou trubičku – kapiláru, hladina rtuti v ní poklesne ve srovnání s hladinou v nádobě. To je způsobeno tvarem hladiny rtuti v kapiláře a existencí povrchového napětí.

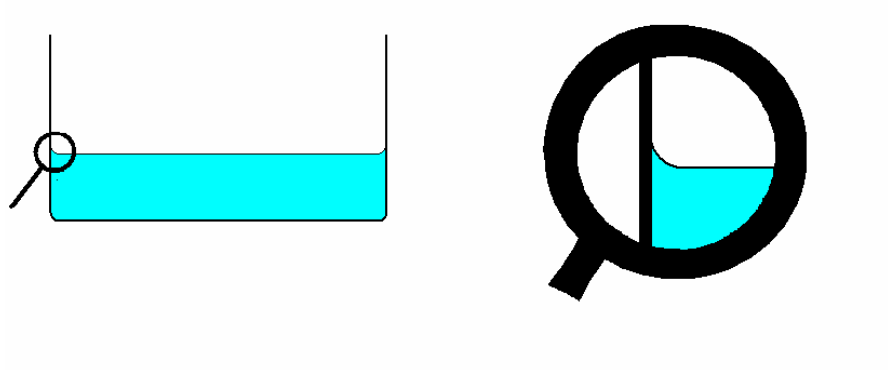


Jak již víme, na libovolnou křivku na povrchu kapaliny působí okolní kapalina tečnými silami povrchového napětí. Podobné tečné síly působí i na kružnici v místě rozhraní vzduch-sklo-rtuť. Výslednice těchto sil působí svisle dolů a vyvolává skokový nárůst tlaku na rozhraní vzduch – rtuť. Těsně pod hladinou tedy nebude celkový tlak roven tlaku atmosférickému, jako by tomu bylo u rovné hladiny, ale bude vyšší o hodnotu kapilárního tlaku p_k.

Budeme-li kapilárou postupovat dále dolů, tlak v ní lineárně narůstá podle vztahu pro hydrostatický tlak. Tlak na dolním otevřeném konci kapiláry musí být stejný jako v okolní kapalině ve stejné hloubce. Hladina rtuti v kapiláře proto musí být pod úrovní okolní volné hladiny. Tento jev se nazývá kapilární deprese (pokles).

Kapilární elevace

Případ, kdy kapalina nádobu nesmáčí, můžeme běžně pozorovat například na vodě ve skleněné nádobě. Rozhraní voda-sklo-vzduch bude vypadat jako průřezu na obrázku.

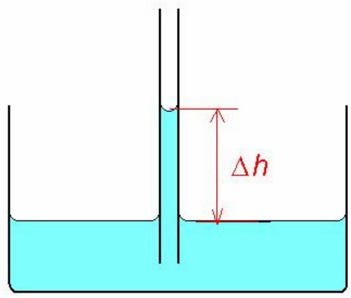


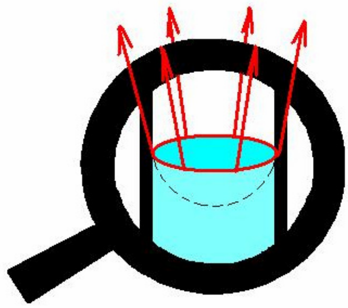
Ponoříme-li do nádoby s vodou tenkou skleněnou trubičku – kapiláru, hladina vody v ní vystoupí ve srovnání s hladinou v nádobě. To je opět způsobeno tvarem hladiny vody v kapiláře a existencí povrchového napětí.

Na libovolnou křivku na povrchu kapaliny působí okolní kapalina tečnými silami povrchového napětí. Podobné tečné síly působí i na kružnici v místě rozhraní vzduch-sklo-voda.

Výslednice těchto sil působí svisle vzhůru a vyvolává skokový pokles tlaku na rozhraní vzduch – voda. Těsně pod hladinou tedy nebude celkový tlak roven tlaku atmosférickému, jako by tomu bylo u rovné hladiny, ale bude nižší o hodnotu kapilárního tlaku p_k.

Budeme-li kapilárou postupovat dále dolů, tlak v ní lineárně narůstá podle vztahu pro hydrostatický tlak. Tlak na dolním otevřeném konci kapiláry musí být stejný jako v okolní kapalině ve stejné

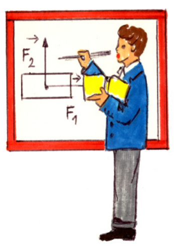




hloubce. Hladina vody v kapiláře proto musí být nad úrovní okolní volné hladiny. Tento jev se nazývá kapilární elevace (vzestup).

Jak jsme viděli na předchozích ilustracích, kapilární deprese a kapilární elevace jsou způsobeny tím, že na zakřiveném rozhraní kapalina - vzduch dochází v důsledku působení sil povrchového napětí ke skokové změně tlaku nazývané kapilární tlak. Vztah pro jeho velikost si nebudeme odvozovat, uvedeme zde pouze výsledek.

Tlak skokově vzroste o hodnotu kapilárního tlaku při přechodu rozhraní směrem k jeho středu křivosti a poklesne při přechodu rozhraní ve směru opačném. Pro povrch kapaliny s povrchovým napětím σ zakřivené do tvaru kulové plochy o poloměru R je velikost kapilárního tlaku $p_k = \dfrac{2\sigma}{R}$.

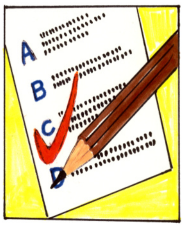


Určete, do jaké výšky h vystoupí voda ve skleněné kapiláře o průměru d=1mm vůči okolní volné hladině. Povrchové napětí vody je σ=73mN·m^{-1}, její hustota ρ=1000kg·m^{-3}, poloměr křivosti hladiny v kapiláře předpokládejte shodný s poloměrem kapiláry.

Řešení:

Voda smáčí skleněnou kapiláru, v úrovni rozhraní vzduch-voda tedy dochází ke skokovému poklesu tlaku z hodnoty tlaku atmosférického p_a o kapilární tlak $p_k = \dfrac{2\sigma}{R} = \dfrac{4\sigma}{d}$. Směrem dolů tlak v kapiláře opět narůstá podle vztahu pro hydrostatický tlak $p_h = h\rho g$, až v úrovni okolní volné hladiny nabývá opět hodnoty p_a. Musí zde tedy platit $p_h = p_k$ a odtud

$$h=\frac{p_h}{\rho g}=\frac{p_k}{\rho g}=\frac{4\sigma}{d\,\rho g}=\frac{4\cdot 73\cdot 10^{-3}}{1\cdot 10^{-3}\cdot 1000\cdot 9{,}81}\,\mathrm{m}\doteq 3\cdot 10^{-2}\,\mathrm{m}=3\mathrm{cm}\,.$$



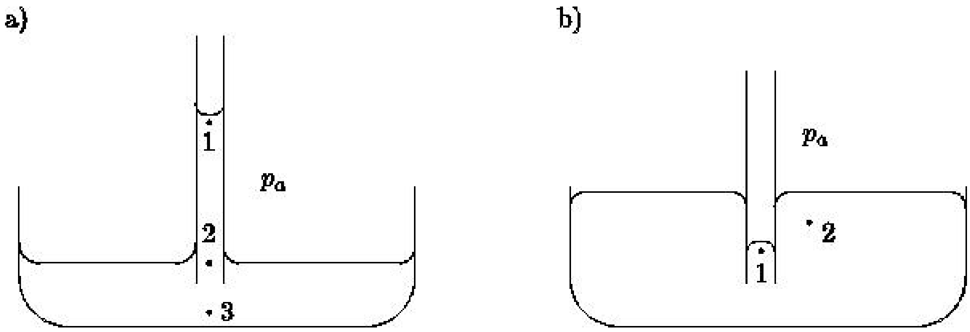
KO2.3-1. Z následujících možností vyberte správné. V důsledku existence povrchového napětí

a) mohou plout lodě po vodě
b) mohou po hladině vody běhat vodoměrky
c) můžeme měřit teplotu rtuťovým teploměrem
d) volná kapalina ve stavu beztíže zaujme kulový tvar
e) omítka domu může při špatné izolaci od země provlhnout do relativně velké výšky

KO2.3-2. Jako jednotku povrchového napětí lze použít

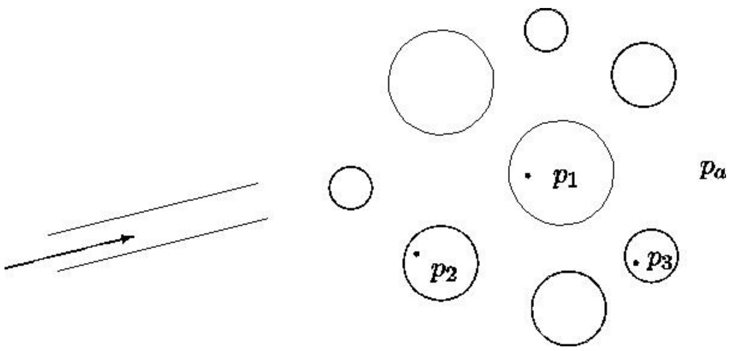
a) N
b) N m^{-1}
c) Pa
d) J m^{-2}
e) kg s^{-2}

KO2.3-3. Podívejte se na obrázky a) a b). Uspořádejte hodnoty tlaků p_a, p_1, p_2, případně i p_3 v jednotlivých místech kapaliny od největší po nejmenší s využitím znamének > a =. Viz. obr. 2.3-3.



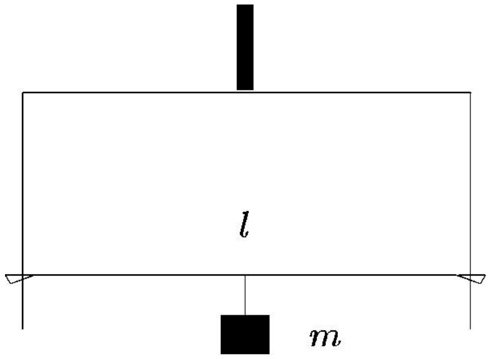
obr. 2.3-3

KO2.3-4. Podívejte se na obrázek bublin různého průměru vyfouknutých ze stejného roztoku (obr. 2.3-4). Uspořádejte hodnoty tlaků p_1, p_2, p_3 uvnitř bublin a atmosférického tlaku p_a od největší po nejmenší s využitím znamének > a =.



obr. 2.3-4

U2.3-5. V rámečku s pohyblivou přepážkou a závažím je blána vytvořená ze saponátového roztoku. Jak velké je jeho povrchové napětí, jestliže přepážka zůstane v klidu při celkové hmotnosti přepážky a závaží $m = 1\,\mathrm{g}$? Šířka rámečku je $l = 10\,\mathrm{cm}$. Viz. obr. 2.3-5.

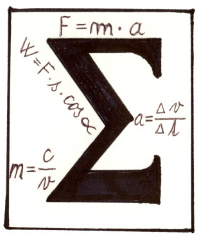


obr. 2.3-5

U2.3-6. O kolik byla větší povrchová energie mýdlové bubliny než kapky roztoku, která z ní po prasknutí vznikla? Průměr bubliny byl $D = 4\,\mathrm{cm}$, průměr kapky $d = 3\,\mathrm{mm}$. Povrchové napětí roztoku je $\sigma = 40\,\mathrm{mN \cdot m^{-1}}$.

U2.3-7. Do neznámé kapaliny byla ponořena kapilára o průměru $d = 0{,}5\,\mathrm{mm}$. Kapalina v ní vystoupila do výšky $h = 2{,}5\,\mathrm{cm}$ vůči okolní volné hladině. Jaké je povrchové napětí kapaliny, je-li její hustota $\rho = 1300\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$?

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly. Vodítkem může být přehled stanovených studijních cílů.



Díky povrchovému napětí, které vzniká v důsledku interakce molekul v povrchové vrstvě kapaliny s okolními molekulami, se povrch kapaliny chová podobně jako pružná blána. Má tendenci se smršťovat (blána tvořená kapalinou vytáhne lehkou přepážku rámečku, svázaná nit po propíchnutí vrstvy uvnitř zaujme tvar kružnice), ve velmi tenkých trubičkách - kapilárách dochází k poklesu nebo výstupu hladiny kapaliny (výživa stromů, vlhnutí zdiva), povrch kapaliny udrží drobné předměty o větší hustotě, než je hustota kapaliny (mince, jehly, hmyz).

Povrchové napětí σ je rovno podílu velikosti povrchové síly ΔF a délky křivky Δl, na kterou kapalina touto silou působí, $\sigma = \Delta F/\Delta l$. Jednotkou povrchového napětí je $\mathrm{Nm^{-1}}$.

Povrchové napětí také odpovídá plošné hustotě povrchové energie: $\sigma = \Delta E/\Delta S$.

Vložíme-li do kapaliny tenkou trubičku, kterou kapalina nesmáčí/smáčí, nastane kapilární deprese/elevace. Jsou způsobeny tím, že na zakřiveném rozhraní kapalina - vzduch dochází v důsledku působení sil povrchového napětí ke skokové změně tlaku (kapilární tlak). Tlak skokově vzroste o hodnotu kapilárního tlaku při přechodu rozhraní směrem k jeho středu křivosti a poklesne při přechodu rozhraní ve směru opačném. Pro povrch kapaliny s povrchovým napětím σ zakřivený do tvaru kulové plochy o poloměru R je velikost kapilárního tlaku $p_k = 2\sigma/R$.

2.4 Proudění ideální tekutiny

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

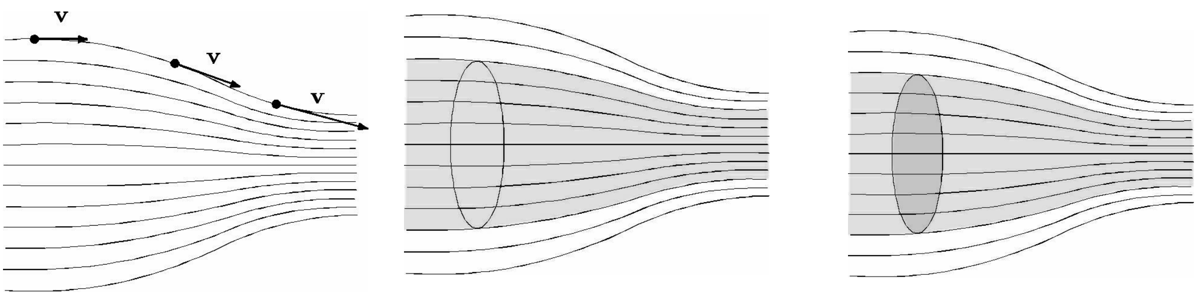
1. vysvětlit, co jsou to proudnice a proudové trubice
2. definovat objemový tok kapaliny a jeho jednotku
3. formulovat slovně i matematicky rovnici spojitosti toku pro ideální kapalinu a vysvětlit, proč musí platit
4. kvalitativně formulovat zákon zachování energie v proudící ideální tekutině
5. hustotu kinetické energie, potenciální energie tlakové a potenciální energie tíhové zapsat pomocí hustoty kapaliny, její rychlosti proudění, tlaku a výšky a sestavit tak Bernoulliovu rovnici
6. využít rovnice spojitosti a Bernoulliovy rovnice pro řešení úloh

120 minut

Trajektorie, rychlost, kinetická energie, práce, potenciální energie, tekutina /2.1/, tlak /2.1/, hustota.

Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

Popis pohybu tekutiny je složitější než popis pohybu tuhých těles, protože částice tekutiny se mohou vzájemně přemísťovat. V proudící tekutině (kapalině, plynu) si můžeme vybrat její malý element a sledovat jeho trajektorii. Prakticky to můžeme realizovat tak, že do určitého bodu, jímž prochází sledovaný element tekutiny, umístíme barvivo (u kapaliny zdroj barvy malých rozměrů, u plynu malý zdroj dýmu). Tekutina pak bude unášet částečky barviva s sebou a trajektorie bude dobře pozorovatelná. Tuto trajektorii nazveme proudnicí. Bude-li proudění tekutiny ustálené, tvar proudnic se nebude v čase měnit, po téže proudnici se budou pohybovat vždy další a další částice tekutiny. Vektor rychlosti proudění tekutiny v daném bodě je vždy tečný k příslušné proudnici, proto se také proudnice nemohou protínat. Proudnice procházející uzavřenou křivkou tvoří proudovou trubici, tekutina uvnitř proudové trubice tvoří proudové vlákno. Viz. obr. 2.4-1.



2.4-1

Proudová trubice se chová jako skutečná trubice v tom smyslu, že žádná částice tekutiny, která se nachází uvnitř proudové trubice, ji nemůže opustit skrz její stěnu a žádná částice nacházející se vně nemůže skrz ni projít dovnitř (důsledkem toho, že se proudnice nemohou protínat). Proto hmotnost tekutiny, která proteče při ustáleném proudění za určitý čas jedním příčným průřezem proudové trubice, musí být stejná jako hmotnost, která proteče libovolným jiným průřezem téže trubice za stejnou dobu. Pro ideální kapalinu, která je nestlačitelná a má tedy všude stejnou hustotu, musí totéž platit i pro její objem.

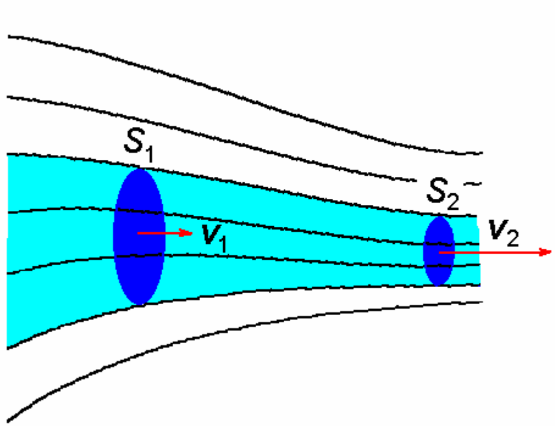
Definujme nejprve veličinu nazvanou objemový tok:

Objemový tok Q_V je objem kapaliny, která proteče daným průřezem trubice za jednotku času,

$$Q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t}.$$

Jednotkou objemového toku je m^3s^{-1}.

Z předchozí úvahy plyne, že objemový tok libovolným příčným průřezem téže proudové trubice je stejný. Proudí-li kapalina v místě o průřezu S_1 rychlostí o velikosti v_1, proteče jím za čas Δt objem $\Delta V = S_1 v_1 \Delta t$. Objemový tok pak bude $Q_V = \frac{\Delta V}{\Delta t} = S_1 v_1$.

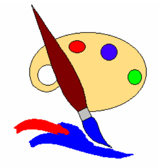


2.4-2

Ten musí být stejný jako objemový tok v místě o průřezu S_2 , kterým protéká kapalina rychlostí o velikosti v_2 . Odtud dostáváme rovnici spojitosti (kontinuity) pro proudění ideální kapaliny.

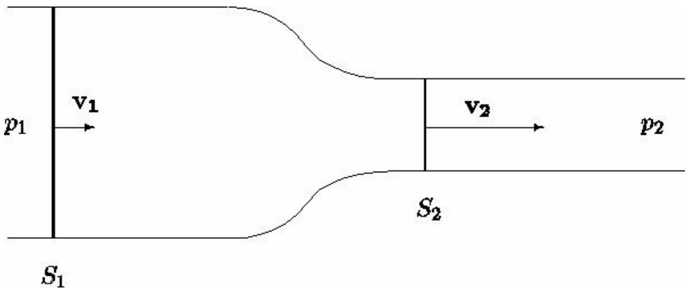
Rovnice spojitosti (kontinuity): $S_1 v_1 = S_2 v_2$.

Nyní zformulujeme zákon zachování energie pro proudící ideální kapalinu. Pozorně projděte následující přepis animace. Celé odvození si nemusíte pamatovat, ale pokuste se je pochopit.



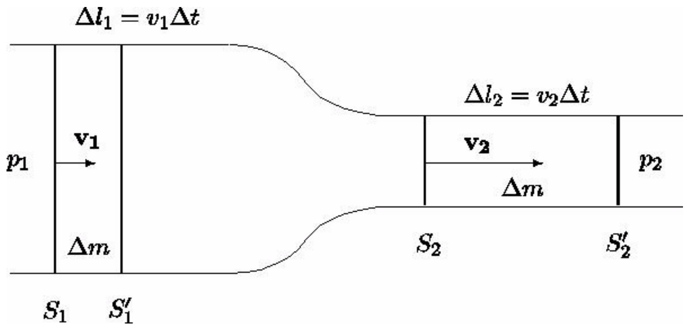
Bernoulliova rovnice

Předpokládejme ustálené proudění kapaliny nejprve vodorovnou zužující se proudovou trubicí . Sledujme kapalinu, která se na začátku nachází v oblasti vymezené trubicí a průřezy S_1 a S_2, kde jsou hodnoty tlaku p_1 a p_2.



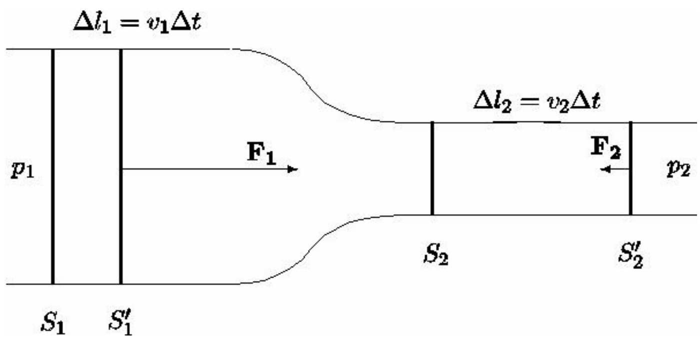
Pro rychlosti proudění kapaliny v těchto místech musí platit rovnice spojitosti, tedy $S_1 v_1 = S_2 v_2$.

Za velmi krátký čas Δt se celá kapalina posune, takže pak bude vymezena průřezy $S_1´$ a $S_2´$, které jsou posunuty vůči S_1 a S_2 o $\Delta l_1 = v_1 \Delta t$ a $\Delta l_2 = v_2 \Delta t$. Jak se změní kinetická energie sledované části kapaliny?



Sledovaná část kapaliny nyní uvolnila oblast mezi průřezy S_1 a $S_1´$ a naopak se nově nachází v oblasti mezi S_2 a $S_2´$. Na počátku i nyní se nachází mezi průřezy $S_1´$ a S_2, její kinetická energie je zde stejná jako na počátku, protože se jedná o ustálené proudění. Přírůstek kinetické energie za čas Δt je tedy roven rozdílu kinetické energie kapaliny v oblasti mezi S_2 a $S_2´$ a v oblasti mezi S_1 a $S_1´$.

Hmotnost obou elementů je stejná: $\Delta m = \rho \, \Delta V = \rho S_1 \, \Delta l_1 = \rho S_1 v_1 \Delta t = \rho S_2 v_2 \Delta t$. Hledaný přírůstek kinetické energie bude $\Delta E_\mathrm{k} = \frac{1}{2} \Delta m \left(v_2^2 - v_1^2 \right)$.



Protože je osa trubice vodorovná, může být tento přírůstek způsoben pouze prací tlakových sil, jakými na námi vybraný element kapaliny působí okolní kapalina. Tlaková síla v oblasti průřezu S_1 má velikost $F_1 = p_1 S_1$ a vykoná na sledované kapalině kladnou práci $W_1 = F_1 \, \Delta l_1 = p_1 S_1 v_1 \Delta t = p_1 \Delta V$, naopak v oblasti průřezu S_2 je

$F_2 = p_2 S_2$ a jí vykonaná práce $W_2 = -F_2\, \Delta l_2 = -\, p_2 S_2\, v_2\, \Delta t = -\, p_2\, \Delta V$ je záporná. Celkově $W = W_1 + W_2 = (p_1 - p_2)\, \Delta V$.

Z rovnosti $\Delta E_\mathrm{k} = W$ plyne podmínka $\frac{1}{2} \Delta m \left(v_2^2 - v_1^2\right) = (p_1 - p_2) \Delta V$. Vydělíme celou rovnici objemem ΔV, dostaneme $\frac{1}{2} \rho \left(v_2^2 - v_1^2\right) = p_1 - p_2$, tu ještě upravíme na výsledný tvar $\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2$.

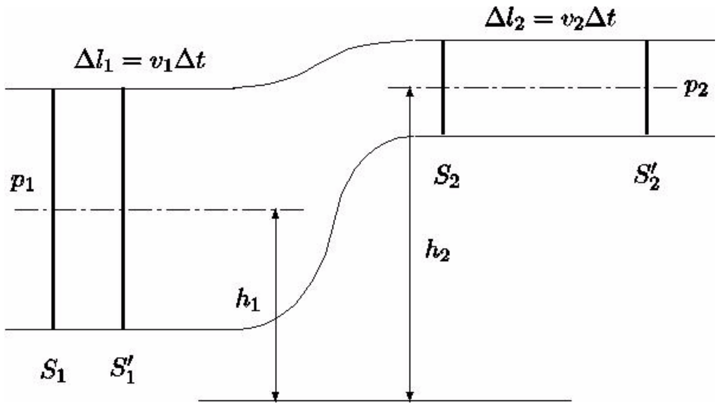
Pokud by byla osa trubice nakloněná nebo zakřivená tak, že průřez S_1 leží ve výšce h_1 a S_2 ve výšce h_2, je třeba vzít v úvahu i změnu potenciální energie tíhové uvažovaných elementů.

Rozdíl potenciální energie tíhové druhého a prvního elementu by byl

$\Delta E_\mathrm{p} = \Delta m\, g \,(h_2 - h_1)$

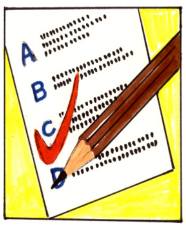
Ze zákona zachování energie $\Delta E_\mathrm{k} + \Delta E_\mathrm{p} = W$ dostaneme po analogické úpravě jako v předchozím případě Bernoulliovu rovnici ve tvaru

$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2$.



Bernoulliova rovnice pro proudící kapalinu: $\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2$

Z odvození Bernoulliovy rovnice je zřejmé, že vyjadřuje zákon zachování energie pro proudící kapalinu. Člen $\frac{1}{2} \rho v^2$ odpovídá hustotě kinetické energie kapaliny v daném místě, člen $\rho g h$ hustotě potenciální energie tíhové a tlak p hustotě tzv. potenciální energie tlakové.



KO2.4.-1. Koncovka zahradní hadice má dvakrát menší průřez (tj. plochu průřezu), než je průřez hadice. Jaká bude velikost rychlosti proudění vody v koncovce vůči velikosti rychlosti proudění vody v hadici?

a) poloviční
b) stejná
c) dvojnásobná
d) čtyřnásobná

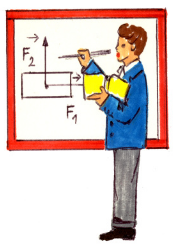
KO2.4.-2. Koncovka zahradní hadice má dvakrát menší průřez, než je průřez hadice. Jaký zde bude objemový průtok vody vůči hodnotě v hadici?

a) poloviční
b) stejný
c) dvojnásobný
d) čtyřnásobný

KO2.4.-3. Koncovka zahradní hadice má dvakrát menší průřez, než je průřez hadice. Jaká zde bude hustota kinetické energie kapaliny vůči hodnotě v hadici?
a) poloviční
b) stejná
c) dvojnásobná
d) čtyřnásobná

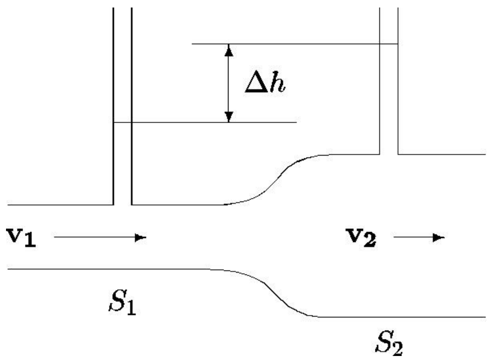
KO2.4.-4. Koncovka zahradní hadice má dvakrát menší průřez, než je průřez hadice. Celá hadice včetně koncovky leží vodorovně. Jaký bude v koncovce tlak vůči tlaku v hadici?
a) menší
b) stejný
c) větší
d) nelze rozhodnout

KO2.4.-5. Bernoulliova rovnice je zvláštním případem zákona zachování které veličiny?



Ideální kapalina proudí vodorovným potrubím, jehož tvar je zakreslen na obrázku. Pro porovnání tlaků je potrubí opatřeno manometrickými trubicemi. O kolik výše vystoupí hladina ve druhé manometrické trubici než v první? Rychlost kapaliny $v_1 = 1{,}5\ \mathrm{m.s^{-1}}$, pro průřezy potrubí platí $S_2 = 3\,S_1$.

Řešení:



obr. 2.4-3

Rozdílná úroveň hladin v manometrických trubicích ukazuje rozdíl tlaků v daných místech potrubí, který lze vypočítat podle vztahu pro hydrostatický tlak $\Delta p = \Delta h\, \rho\, g$, odtud

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho\, g}.$$

Rozdíl tlaků lze určit z Bernoulliovy rovnice

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \Rightarrow \Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{2}\rho\left(v_1^2 - v_2^2\right).$$

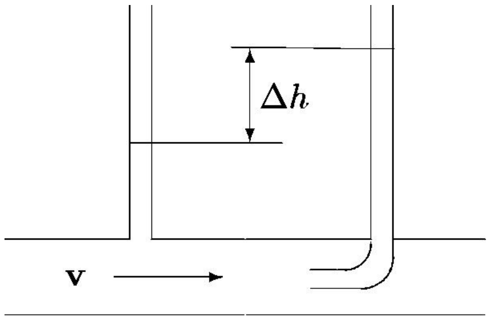
Potřebujeme ještě určit rychlost v_2, k tomu využijeme rovnici kontinuity, odkud plyne, že

$$v_2 = \frac{S_1 \,.\, v_1}{S_2} = \frac{S_1 \,.\, v_1}{3 \,.\, S_1} = \frac{v_1}{3}.$$

Po dosazení dostaneme

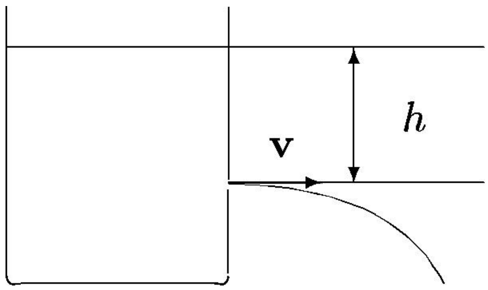
$$\Delta h = \frac{v_1^2}{2\,g}\left(1 - \frac{1}{3^2}\right) = \frac{1{,}5^2}{2.10}\cdot\frac{8}{9}\,m = 0{,}1\,m\,.$$

U2.4.-6. Zařízení na **obrázku** 2.4-4, nazývané Pitotova trubice, slouží k měření rychlosti proudící kapaliny. Využívá toho, že tlak v zahnuté trubici na jejích dolním konci ohnutém proti směru rychlosti kapaliny je větší o hodnotu odpovídající hustotě kinetické energie proudící kapaliny. Jaká byla rychlost proudění vody, vystoupila-li v zahnuté trubici o $\Delta h = 8$ cm výše než v trubici rovné?



obr. 2.4-4

U2.4.-7. Jak velkou rychlostí vytéká voda z nádoby na **obrázku** 2.4-5, je-li otvor v hloubce h = 50 cm pod volnou hladinou?

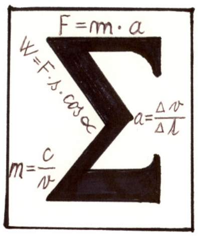


obr. 2.4-5

U2.4.-8. Na obrázku obr. 2.4-6 vidíte ustálený proud vody vytékající z kohoutku. Předpokládejte, že neobsahuje žádné vzduchové bublinky. V místě výtoku je obsah kolmého průřezu proudící kapalinou $S_1 = 2\text{cm}^2$. Obsah průřezu o $h = 5\text{cm}$ níže je $S_2 = 0{,}9\text{cm}^2$. Za jak dlouho se naplní celé desetilitrové umyvadlo?

obr. 2.4-6

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly. Vodítkem opět může být přehled studijních cílů z jejího úvodu.



Proudnice jsou čáry odpovídající trajektoriím částeček kapaliny, rychlost kapaliny je v libovolném bodě tečná k proudnici, proudnice se při ustáleném proudění neprotínají. Proudnice procházející uzavřenou křivkou tvoří proudovou trubici.

Objemový tok Q_V je objem kapaliny, která proteče daným průřezem trubice za jednotku času, $Q_V = \dfrac{\Delta V}{\Delta t}$.
Jednotkou objemového toku je $m^3 s^{-1}$.

Objemový tok ideální kapaliny libovolným příčným průřezem téže proudové trubice je stejný, to vyjadřuje rovnice spojitosti (kontinuity): $S v = \text{konst.}$

V proudící ideální kapalině se celková mechanická energie (složená z kinetické energie kapaliny, potenciální energie tíhové a potenciální energie tlakové) zachovává. Tento zákon vyjadřuje Bernoulliova rovnice: $\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h + p = \text{konst.}$

2.5 Teplota a teplotní stupnice

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:
1. charakterizovat teplotu jako veličinu udávající směr tepelné výměny mezi tělesy
2. uvést alespoň 3 různé příklady, jak se projevuje změna teploty na vlastnostech těles
3. popsat Celsiovu teplotní stupnici
4. vysvětlit, jak je definována termodynamická teplotní stupnice a jaká je její jednotka
5. převádět hodnoty mezi těmito stupnicemi

30 minut

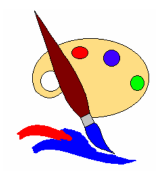
Mechanická energie

Prostudujte následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a vztahů.

Až dosud jsme se zabývali studiem mechanických vlastností těles, kde hrál významnou roli zákon zachování mechanické energie. Ne při všech dějích se ale mechanická energie zachovává. V následujících kapitolách se proto seznámíme s dalšími formami energie (vnitřní energie, teplo). Studiem vzájemných přeměn těchto forem energie a jejich výměny mezi tělesy se zabývá termodynamika. Klíčovou veličinou v termodynamice je teplota.

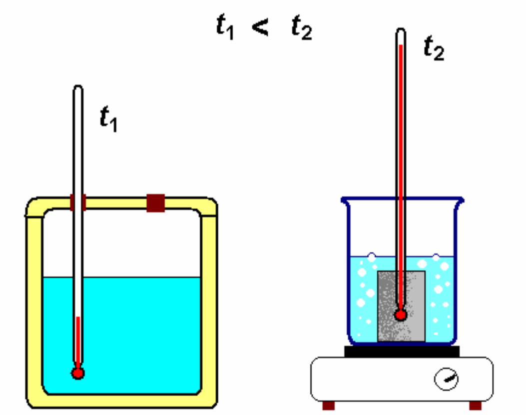
Tato veličina je intuitivně dobře známa z běžné zkušenosti. Změna teploty se projevuje změnou dalších charakteristik těles, čehož se také prakticky využívá k jejímu měření. Změny objemu kapalin využívají kapalinové teploměry, změny tlaku plynu uzavřeného v nádobce o konstantním objemu teploměry plynové, teplotní roztažnosti pevných látek bimetalové teploměry a spínače. S teplotou se také mění elektrická vodivost látek, toho využívají například termistory. Tělesa zahřátá na vysokou teplotu vyzařují světlo, jehož barva a intenzita se s teplotou mění, čehož využívají k měření teploty radiační teploměry (pyrometry). S většinou těchto jevů se seznámíte podrobněji v následujících kapitolách.

V termodynamice je teplota důležitou veličinou, charakterizující tepelnou rovnováhu těles nebo jejich částí. Mějme dvě tělesa, změřme libovolným způsobem jejich teploty a přiložme je k sobě (přepokládejme, že celý systém je izolován od okolí). Těleso, které je na začátku teplejší, bude předávat tepelnou výměnou energii druhému tělesu a bude se ochlazovat, těleso na počátku chladnější bude tuto energii přijímat a bude se zahřívat. Po dostatečně dlouhé době se teplota obou těles vyrovná a tepelná výměna mezi nimi ustane, tělesa se nacházejí v tepelné rovnováze. Dvě tělesa jsou v tepelné rovnováze právě tehdy, když mají stejné teploty. Podívejte se na následující příklad.

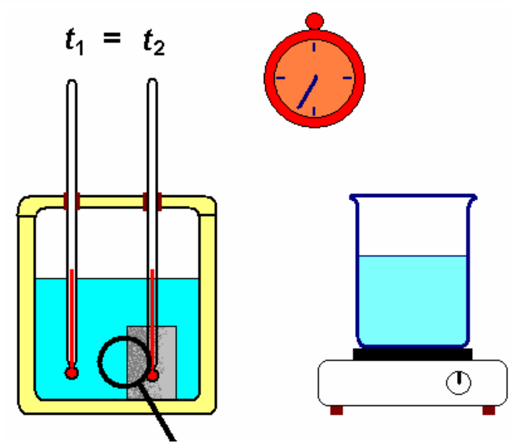


Teplota a stav tepelné rovnováhy

Mějme kalorimetr s vodou pokojové teploty t_1 a závaží, které zahřejeme například ve vodní lázni. Jeho teplota t_2 změřená zabudovaným teploměrem bude vyšší; je-li vodní lázeň vařící, bude cca 100°C. Přemístíme-li zahřáté závaží do kalorimetru a ponecháme tuto soustavu samovolnému vývoji, teplota vody (chladnějšího tělesa) bude narůstat, teplota závaží (teplejšího tělesa) klesat, až se vyrovnají.

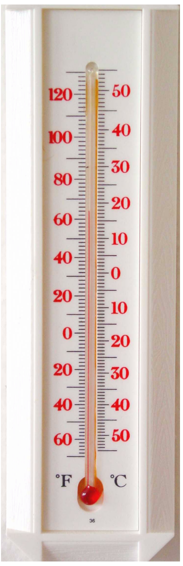


Po vyrovnání obou teplot tepelná výměna mezi tělesy ustane, nastane tepelná rovnováha, teplota soustavy ani jejích částí se už nemění.



K vyrovnání teploty dochází v důsledku interakce molekul obou těles. Jak uvidíte později, teplota tělesa souvisí s jeho vnitřní energií. Při vyšší teplotě je chaotický pohyb částic tvořících těleso výraznější než při nižší teplotě. Dáme-li tělesa různé teploty do kontaktu, budou si jejich molekuly předávat energii prostřednictvím nárazů. Při těchto nárazech bude více energie přecházet z teplého tělesa na chladnější než naopak. To se projeví změnami jejich teplot. Po vyrovnání teplot se energie přijímaná a odevzdaná každým tělesem vyrovná, teplota obou těles je pak stejná a dále se nemění.

K měření teploty potřebujeme zavést teplotní stupnici. V běžném životě nejčastěji využíváme Celsiovy teplotní stupnice. Je založena na dvou základních teplotách: teplotě tání ledu (t = 0 °C) a teplotě varu vody (t =100 °C) za normálního tlaku. Tento interval je rozdělen na sto stejných dílků, z nichž každý odpovídá změně o jeden stupeň Celsia. Na teploměru na fotografii (obr. 2.5-1) si můžete všimnout dvou stupnic, kromě Celsiovy stupnice je zde i Fahrenheitova, která se používá zejména v USA.



Obr. 2.5-1

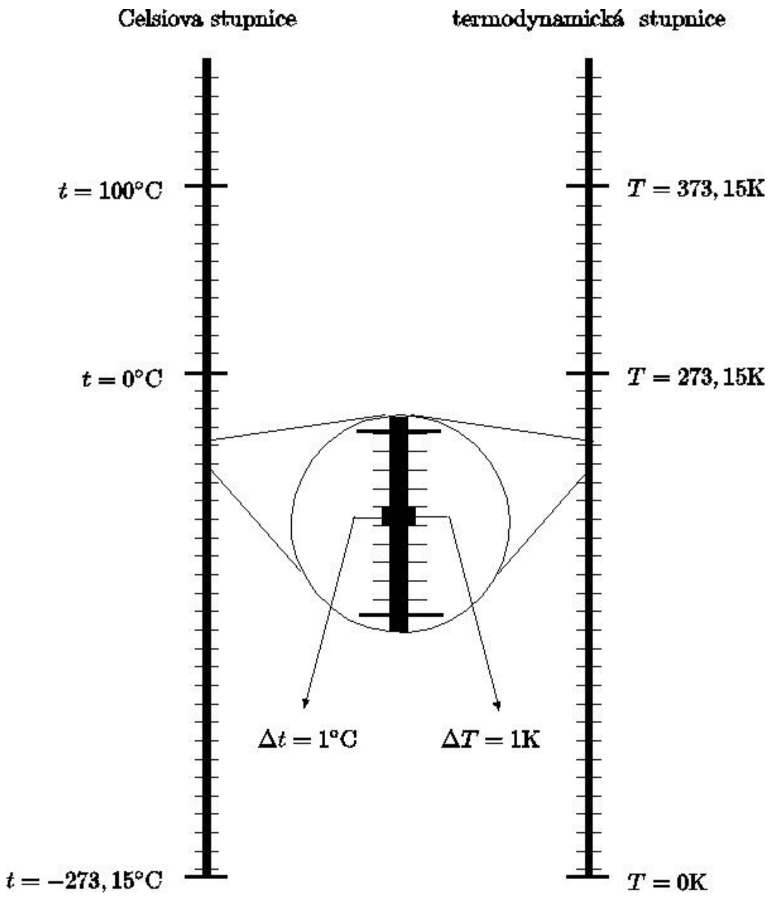
Fyzikálně význačná je termodynamická (absolutní, Kelvinova) teplotní stupnice, teplotu měřenou v této stupnici je zvykem označovat symbolem T. Základní jednotkou termodynamické teploty je jeden kelvin (K). Teplota T = 0 K odpovídá fyzikálně nejnižší možné hodnotě teploty (absolutní nule). Této teploty nelze prakticky dosáhnout, lze se jí jen přiblížit. Základním bodem termodynamické stupnice je tzv. trojný bod vody, teplota, při níž se v rovnováze nachází voda ve skupenství pevném, kapalném i plynném. Trojnému bodu vody je přiřazena teplota T = 273,16 K. Kelvin je základní jednotkou soustavy SI, jeden kelvin je definován jako 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody.

Převod mezi Celsiovou a Kelvinovou stupnicí je následující:

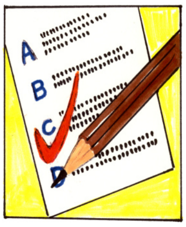
$$t = (\{T\} - 273{,}15)\ °\mathrm{C}$$

$$T = (\{t\} + 273{,}15)\mathrm{K}$$

Vidíme tedy, že změna teploty o 1 K je stejná jako změna teploty o 1 °C (hodnota 273,16 K byla pro trojný bod vody zvolena právě proto, aby se velikosti dílků obou stupnic shodovaly). Viz. obr. 2.5-2.



obr. 2.5-2



KO2.5.-1. Do tepelného kontaktu dáme dvě tělesa o stejné teplotě. Bude mezi nimi docházet k výměně tepla?

KO2.5.-2. Níže je uvedeno několik fyzikálních zákonů. Aniž byste museli znát význam všech veličin, které se zde vyskytují, měli byste být schopni vybrat, ve kterých případech lze zaměnit Celsiovu teplotu *t* za termodynamickou teplotu *T* nebo naopak, aniž by byla narušena jejich platnost (předpokládejte vždy současnou záměnu všech proměnných označujících teplotu).

a) $pV = nRT$

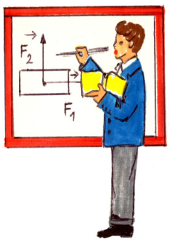
b) $l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$

c) $\lambda \cdot T = b$

d) $H = \sigma \cdot T^4$

e) $R = R_0(1 + \alpha t)$

f) $Q = mc(T_2 - T_1)$



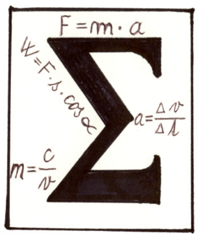
Trojný bod vody má termodynamickou teplotu $T = 273{,}16\,\mathrm{K}$. Jaká je jeho teplota *t* vyjádřená ve stupních Celsia? Řešení:

Z převodního vztahu mezi termodynamickou a Celsiovou teplotní stupnicí plyne, že

$$t = (\{T\} - 273{,}15)\,°\mathrm{C} = (273{,}16 - 273{,}15)\,°\mathrm{C} = 0{,}01\,°\mathrm{C}.$$

U2.5.-3. Nejvyšší teplota vzduchu na Zemi, naměřená v Africe, byla $58\,^{\circ}\mathrm{C}$. Nejnižší, naměřená v Antarktidě, byla $-88\,^{\circ}\mathrm{C}$. Určete rozdíl těchto teplot ve stupních Celsia. Jaké jsou odpovídající termodynamické teploty a jejich rozdíl? Výsledky uvádějte zaokrouhlené na celé stupně.

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly s ohledem na vytýčené studijní cíle.



Tělesa nebo jejich části se nacházejí v tepelné rovnováze, mají-li stejnou teplotu. V izolovaném systému dvou těles, která měla na počátku různé teploty a byla uvedena do tepelného kontaktu, bude teplejší těleso předávat energii chladnějšímu, až se jejich teploty vyrovnají.

Změna teploty těles se projevuje změnou mnoha jejich vlastností, například rozměrů, elektrické vodivosti, vyzařování.

Celsiova teplotní stupnice je založena na dvou základních teplotách: teplotě tání ledu (t=0 °C) a teplotě varu vody (t=100 °C) za normálního tlaku.

Základním bodem termodynamické stupnice je trojný bod vody, kterému je přiřazena teplota T=273,16 K. Teplota T=0 K odpovídá fyzikálně nejnižší možné, prakticky nedosažitelné, hodnotě teploty (absolutní nule). Kelvin je základní jednotkou SI, jeden kelvin je definován jako 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody.

Převod mezi oběma stupnicemi je následující: t=({T}-273,15) °C, T=({t}+273,15) K

2.6 Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. vyjádřit slovně i matematicky, jak se mění lineární rozměry pevných látek v závislosti na teplotě, co je teplotní součinitel délkové roztažnosti a jakou má jednotku
2. vyjádřit slovně i matematicky, jak se mění objem pevných látek v závislosti na teplotě, co je teplotní součinitel objemové roztažnosti a jakou má jednotku
3. uvést alespoň 3 příklady z běžné zkušenosti, kde se teplotní roztažnost pevných látek projevuje
4. vyjádřit slovně i matematicky, jak se mění objem kapalin v závislosti na teplotě
5. uvést příklad využití teplotní roztažnosti kapalin
6. vysvětlit, co je tzv. anomálie vody
7. vyhledat teplotní součinitele roztažnosti pevných látek a kapalin v tabulkách a využít je při řešení úloh

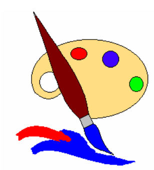
90 minut

Objem, teplota /2.5/, hustota

Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

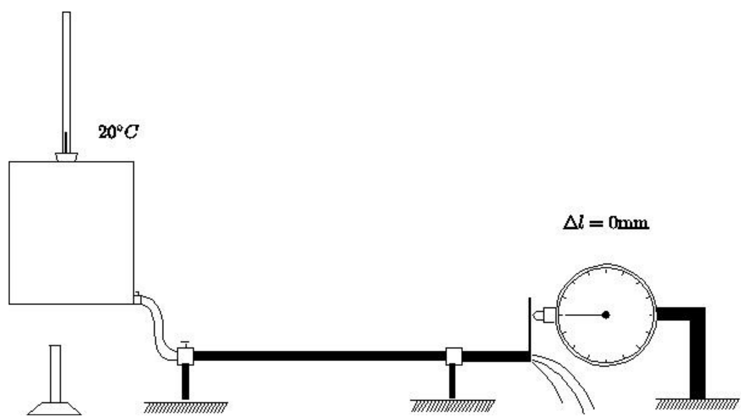
Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, pevné látky i kapaliny mění své rozměry v závislosti na teplotě. I když jsou tyto změny relativně malé, jsou prakticky využitelné například právě při měření teploty. V jiných případech jsou tyto změny naopak nežádoucí a musí kvůli nim být přijímána speciální opatření. V létě se stává, že při dlouhotrvajících vysokých teplotách se v důsledku teplotní roztažnosti zkroutí kolejnice, dříve se mezi nimi z tohoto důvodu nechávaly dilatační spáry. Na teplotní roztažnost je třeba pamatovat i při stavbě budov, konstrukci potrubí, elektrických vedení a podobně.

Jak konkrétně se mění rozměry tělesa z určitého materiálu s teplotou, můžeme změřit pomocí následujícího experimentu.

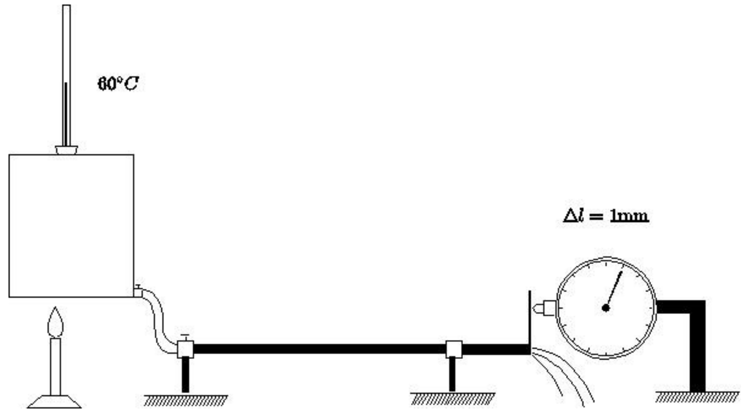


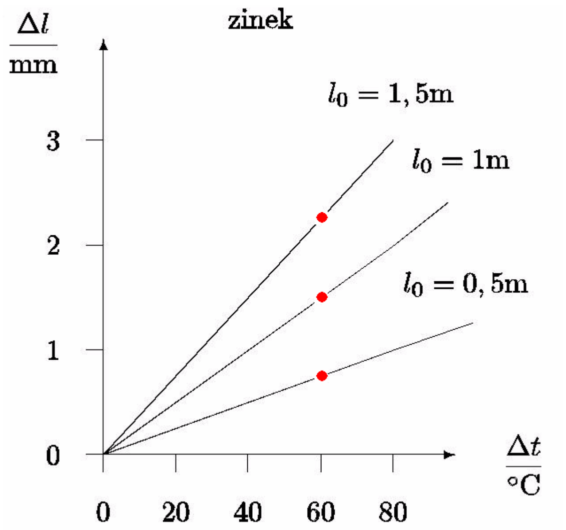
Délková teplotní roztažnost tuhých těles

Dutou tyč ze studovaného materiálu, například zinku, jedním koncem provlékneme objímkou, v níž se může volně posouvat, druhý konec upevníme a zavedeme sem hadici z nádoby s vodou. K volnému konci tyče umístíme dilatometr (zařízení umožňující měřit velmi malé změny délky). Tyčí pak necháme protékat vodu známé teploty, na počátku např. 20 °C. Dilatometr vynulujeme, tyč má počáteční délku (l_0).



Vodu v nádobě pak zahřejeme na vyšší teplotu a opět ji pustíme do tyče. Musíme ji nechat protékat poměrně dlouho, aby se tyč stačila zahřát až na teplotu vody. Teplotu t a nárůst délky tyče Δl zaznamenáme.





Stejným způsobem změříme prodloužení tyče pro několik dalších teplot. Výsledky vyneseme do grafu. Vidíme, že prodloužení tyče Δl je přímo úměrné přírůstku její teploty Δt.

Zopakujeme měření pro několik různých délek tyče z téhož materiálu. Zjistíme, že prodloužení tyče při zahřátí o stejnou teplotu Δt je přímo úměrné také počáteční délce tyče l_0.

Zopakujeme měření pro několik tyčí stejné počáteční délky, ale z různých materiálů. Zjistíme, že prodloužení tyče při zahřátí o stejnou teplotu Δt je pro různé materiály různé.

Celkově tedy vidíme, že prodloužení zahřívané tyče

1. závisí na materiálu
2. je přímo úměrné přírůstku teploty Δt
3. je přímo úměrné počáteční délce l_0

Prodloužení tyče můžeme tedy vyjádřit jako

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t ,$$

kde α je konstanta charakterizující daný materiál, nazývá se teplotní **součinitel délkové roztažnosti**, jeho jednotkou je K^{-1}.

Prodloužení tyče původní délky l_0 po zahřátí o teplotu Δt je rovno $\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$, kde α je teplotní součinitel délkové roztažnosti daného materiálu.

Teplotní součinitel délkové roztažnosti daného materiálu udává, o kolik se prodlouží tyč z tohoto materiálu původní délky 1 metr po zahřátí o 1 teplotní stupeň. Jeho jednotkou je K^{-1}.

Hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti různých látek lze najít v tabulkách. Pro většinu pevných látek jsou v řádu 10^{-6} až 10^{-5} K^{-1}.

Nyní již můžeme dosazením a jednoduchou úpravou snadno vyjádřit, jak závisí na teplotě celková délka tyče $l = l_0 + \Delta l$.

Je-li l_0 délka tyče při teplotě t_0, bude její délka při teplotě t dána vztahem: $l = l_0[1 + \alpha(t - t_0)]$.

Objem pevného tělesa se s teplotou mění podobným způsobem. Je-li materiál tělesa izotropní (tj. má stejné vlastnosti ve všech směrech), budou se všechny jeho rozměry při zahřívání prodlužovat podle výše uvedeného vztahu se stejnou hodnotou α. Pro jednoduchost uvažme izotropní krychli s počáteční délkou hrany a_0. Po zahřátí o Δt bude délka hrany $a = a_0(1 + \alpha\Delta t)$ a objem krychle

$$V = a^3 = a_0^3(1 + \alpha\Delta t)^3 = a_0^3(1 + 3\alpha\Delta t + 3\alpha^2\Delta t^2 + \alpha^3\Delta t^3) \doteq a_0^3(1 + 3\alpha\Delta t) = V_0(1 + \beta\Delta t),$$

kde jsme využili toho, že součin $\alpha\Delta t \ll 1$, jeho druhou a třetí mocninu tedy můžeme zanedbat, a zavedli označení $3\alpha = \beta$.

Je-li V_0 objem pevného tělesa při teplotě t_0, bude jeho objem při teplotě t dán vztahem: $V = V_0[1 + \beta(t - t_0)]$,

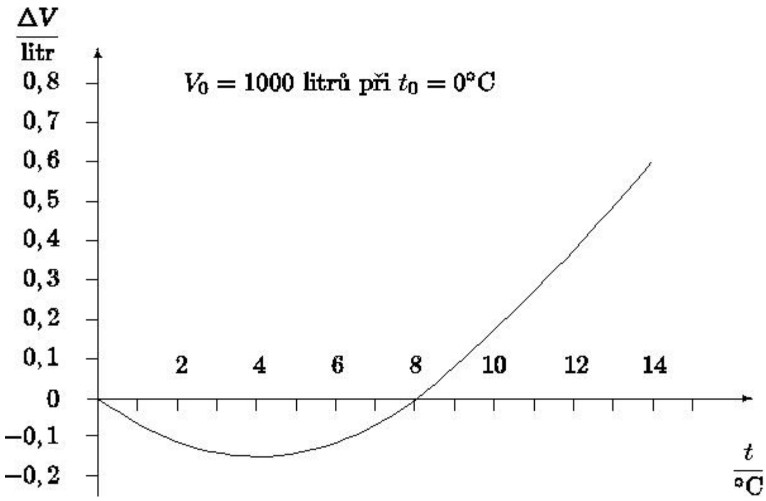
kde β je teplotní součinitel objemové roztažnosti dané pevné látky, jeho jednotkou je opět K^{-1}.
Pro izotropní tělesa platí $\beta \doteq 3\alpha$.

Podobně u většiny kapalin jejich objem s rostoucí teplotou roste, pro nepříliš velké změny teploty opět přibližně lineárně.

Je-li V_0 objem kapaliny při teplotě t_0, bude jeho objem při teplotě t dán vztahem: $V = V_0[1 + \beta(t - t_0)]$,

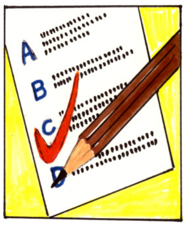
kde β je teplotní součinitel objemové roztažnosti kapaliny, který lze opět nalézt v tabulkách. Tento součinitel je u většiny kapalin větší než u pevných látek, jeho hodnota je řádově 10^{-4} až 10^{-3} K^{-1}.

Důležitou výjimkou z předchozího pravidla je chování vody při teplotách blízkých 0 ºC. Na obrázku 2.6-1 je zachyceno, jak se bude měnit objem 1000 litrů vody, kterou budeme od 0 ºC postupně zahřívat.



obr. 2.6-1

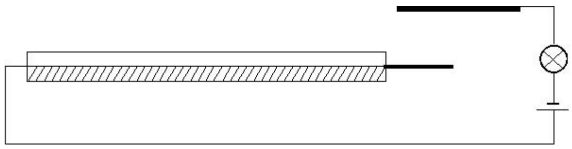
Voda zaujme nejmenší objem při teplotě asi 4 ºC (přesněji 3,98 ºC), mezi 0 ºC a touto teplotou její objem s rostoucí teplotou klesá. Tato vlastnost se nazývá anomálie vody. Je velice užitečná pro uchování života ve vodě v oblastech, kde mrzne, díky anomálii vody promrzají vodní nádrže shora dolů a ne naopak.



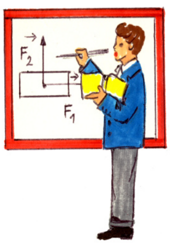
KO2.6.-1. Jaké bude rozložení teplot pod hladinou na povrchu zamrzlého jezera? Uspořádejte jednotlivé teploty v pořadí, v jakém je mohla zaznamenat sonda pomalu spouštěná od hladiny směrem ke dnu: a) 4 ºC, b) 3 ºC, c) 2 ºC, d) 1 ºC. Nápověda:
uvědomte si, že objem určitého množství kapaliny se s teplotou mění opačným způsobem než její hustota.

KO2.6.-2. Jaké bude rozložení teplot pod hladinou téhož jezera v létě, kdy sonda zaznamenala mimo jiné teploty : a) 20 ºC, b) 18 ºC, c) 15 ºC, d) 10 ºC? Uspořádejte opět jednotlivé teploty v pořadí, v jakém je zaznamenala sonda pomalu spouštěná od hladiny směrem ke dnu.

KO2.6.-3. Na obrázku je načrtnuto spínací zařízení, které zahřátí nad určitou teplotu signalizuje rozsvícením žárovky. Bimetalový pásek je složen z oceli a zinku. Který z těchto materiálů odpovídá vyšrafovanému pásku? Potřebné údaje nalezněte v tabulkách. Viz. obr. 2.6-2 Bimetalový spínač.



obr. 2.6-2 Bimetalový spínač



S jakým prodloužením Δl je třeba počítat u kolejnice, která má při teplotě $t_1 = -30\ ^\circ\mathrm{C}$ délku $l_1 = 20\,\mathrm{m}$, vzroste-li teplota na $t_2 = 50\ ^\circ\mathrm{C}$?

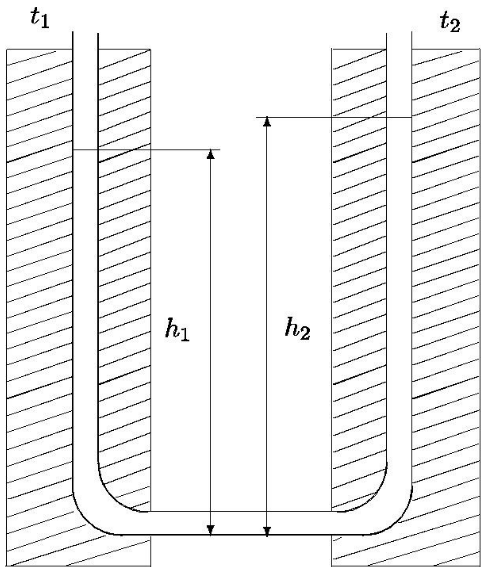
Řešení:

V tabulkách najdeme hodnotu teplotního součinitele délkové roztažnosti oceli (železa) $\alpha = 1{,}2 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{K}^{-1}$. Výsledná délka kolejnice při teplotě t_2 bude $l_2 = l_1\left[1 + \alpha\left(t_2 - t_1\right)\right]$, její prodloužení pak

$$\Delta l = l_2 - l_1 = l_1\,\alpha\left(t_2 - t_1\right) = 20 \cdot 1{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot \left[50 - \left(-30\right)\right]\mathrm{m} = 1{,}9 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m} = 1{,}9\,\mathrm{cm}\,.$$

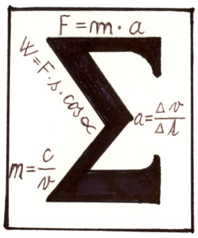
U2.6.-4. Při teplotě $t_1 = 50\ ^\circ\mathrm{C}$ sahá rtuť až po okraj olověného hrnce. Jakou část hrnce bude zaujímat po vychladnutí na $t_2 = 20\ ^\circ\mathrm{C}$? Součinitele délkové teplotní roztažnosti olova a objemové teplotní roztažnosti rtuti vyhledejte v tabulkách.

U2.6.-5. Objemovou roztažnost kapalin lze měřit zařízením, jehož zjednodušený náčrt vidíte na obrázku 2.6-3. Jedno rameno U-trubicese zkoumanou kapalinou je udržováno na nižší teplotě, druhé rameno na vyšší teplotě. Jaký je součinitel objemové roztažnosti petroleje, je-li jeho teplota v chladnějším rameni $t_1 = 20\ ^\circ\mathrm{C}$ a petrolej zde dosahuje výšky $h_1 = 30\,\mathrm{cm}$, v teplejším rameni $t_2 = 40\ ^\circ\mathrm{C}$ a petrolej zde dosahuje výšky $h_2 = 30{,}58\,\mathrm{cm}$? Nápověda: uvědomte si, jak souvisí objem určitého množství kapaliny s její hustotou a využijte toho, že hydrostatický tlak na dolním konci obou ramen musí být stejný.



obr. 2.6-3

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly s ohledem na stanovené studijní cíle.



Prodloužení zahřívaného tělesa je přímo úměrné teplotě, původní délce a teplotnímu součiniteli délkové roztažnosti daného materiálu. Teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu α udává, o kolik se prodlouží tyč z tohoto materiálu původní délky 1 metr po zahřátí o 1 teplotní stupeň, jeho jednotkou je K^{-1}. Je-li l_0 délka tyče při teplotě t_0, bude její délka při teplotě t dána vztahem $l = l_0\left[1+\alpha\left(t-t_0\right)\right]$.

Analogicky se s teplotou mění i objem pevných a kapalných těles. Je-li V_0 objem tělesa při teplotě t_0, bude jeho objem při teplotě t dán vztahem: $V = V_0\left[1+\beta\left(t-t_0\right)\right]$, kde β je teplotní součinitel objemové roztažnosti. Pro izotropní pevná tělesa platí $\beta \approx 3\alpha$.

Výjimkou je chování vody při teplotách blízkých nule, její objem je nejmenší při přibližně 4 ºC (anomálie vody).

Teplotní roztažnosti kapalin a pevných látek se využívá např. při konstrukci teploměrů a spínačů (kapalinové teploměry, bimetalové teploměry a spínače). Na teplotní roztažnost je třeba brát zřetel při konstrukci budov, potrubí, elektrických vedení a podobně.

2.7 Termodynamická soustava. Vnitřní energie, práce, teplo

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. definovat pojmy izolovaná, neizolovaná, uzavřená, otevřená a adiabaticky izolovaná soustava
2. popsat, co zahrnuje veličina nazvaná vnitřní energie a na příkladu vysvětlit, jak ji lze měnit konáním práce nebo tepelnou výměnou
3. slovně i matematicky zformulovat zákon zachování energie pro termodynamickou soustavu
4. řešit jednoduché úlohy využívající tohoto zákona

45 minut

Kinetická a potenciální energie, síla, práce, teplota /2.5/, tepelná rovnováha /2.5/.

Poté, co se ujistíte o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů

Jak jsme již uvedli v kapitole Teplota a teplotní stupnice, termodynamika se zabývá studiem vzájemných přeměn různých forem energie nejen mechanické povahy (vnitřní energie, práce, teplo) a jejich výměny mezi tělesy, zejména v souvislosti se změnou teploty. Také jsme se seznámili s výměnou energie mezi tělesy ve formě tepla, kdy teplejší těleso při vzájemném kontaktu předává tepelnou energii tělesu chladnějšímu. To se projeví poklesem teploty teplejšího a nárůstem teploty chladnějšího tělesa, po dostatečně dlouhé době se jejich teploty vyrovnají a celý systém se pak nachází ve stavu tepelné rovnováhy. Při tomto ději se mění vnitřní energie obou těles. Vnitřní energie tělesa zahrnuje kinetickou energii neuspořádaného pohybu jednotlivých částic, z nichž je těleso složeno, a jejich vzájemnou potenciální energii, nikoli však kinetickou a potenciální energii související s pohybem a polohou tělesa jako celku. Zahřejeme-li těleso na vyšší teplotu, jeho vnitřní energie vzroste. Vnitřní energii tělesa můžeme zvýšit i konáním práce, například stlačíme-li plyn uzavřený v trubici s pohyblivým pístem.

Při těchto termodynamických dějích se mění stav těles, který můžeme charakterizovat pomocí stavových veličin jako teplota, tlak, objem, vnitřní energie. Mezi stavové veličiny nepatří teplo a práce, které souvisí pouze s probíhajícími ději (nemůžeme říci, že těleso má určité teplo nebo práci, pouze že např. přijalo teplo nebo vykonalo práci o určité velikosti).

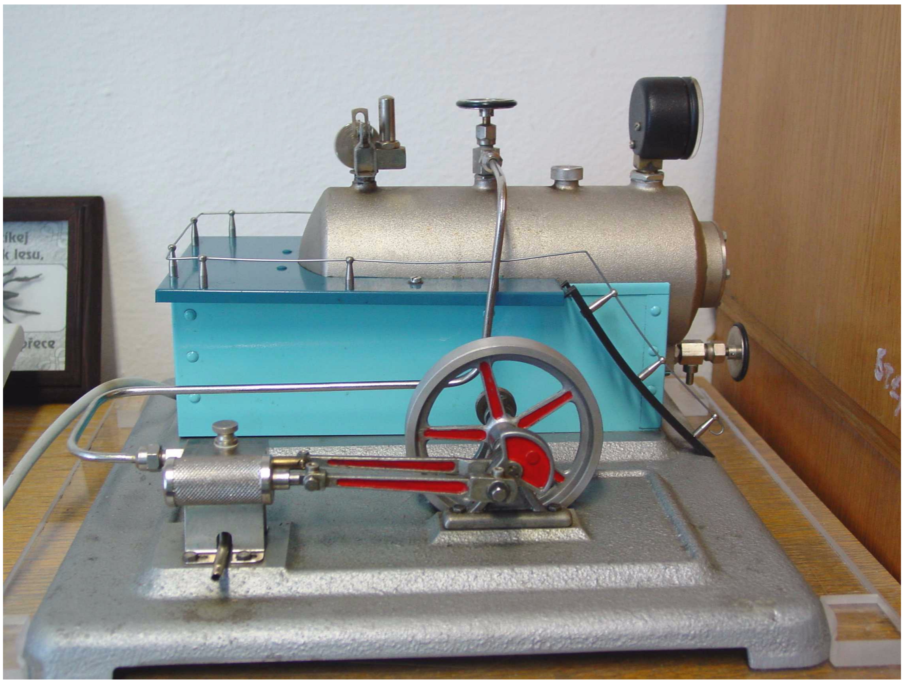
Ponecháme-li termodynamickou soustavu od určitého okamžiku v neměnných vnějších podmínkách, přejde po určité době samovolně do rovnovážného stavu. V tomto stavu neprobíhají na soustavě žádné makroskopické změny a stavové veličiny se nemění.

Podle typu dějů, jaké mohou na studovaných soustavách těles probíhat, rozlišujeme soustavy
otevřené, které si vyměňují částice s okolím
uzavřené, které si s okolím částice nevyměňují
neizolované, které si s okolím vyměňují částice nebo energii
izolované, které si s okolím nevyměňují částice ani energii
adiabaticky izolované, které si s okolím nevyměňují energii ve formě tepla.

Nyní zformulujme zákon zachování energie při termodynamickém ději.

Nejprve předpokládejme, že se vnitřní energie systému U mění pouze výměnou tepla Q s okolím. Teplo považujeme za kladné, $Q>0$, pokud je dodáno do systému z okolí (například pomocí vařiče nebo kontaktem s nějakým jiným teplejším tělesem), naopak, předává-li systém teplo do okolí, bude $Q<0$. Pak změna vnitřní energie systému bude přímo rovna přijatému teplu: $\Delta U = Q$.

Nyní předpokládejme, že systém je adiabaticky izolován od okolí a jeho vnitřní energie U se tedy mění pouze konáním práce W. Práci, kterou koná okolí na systému, považujeme za zápornou, $W<0$, změna vnitřní energie systému je pak kladná, $\Delta U = -W$ (například při obrábění na soustruhu se výrobek zahřívá, podobně při brždění pomocí tření nebo stlačení plynu v hustilce). Naopak práci, kterou koná systém na okolí, bereme jako kladnou, $W>0$ (např. rozpínající se plyn nadzdvihne píst). Vnitřní energie systému pak klesá.



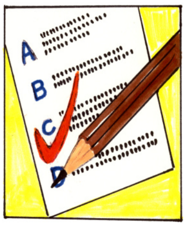
obr. 2.7-1

Tato znaménková konvence je dána historickými důvody. Jedním z hlavních úkolů termodynamiky bylo studium účinnosti tepelných strojů, jejichž účelem většinou bylo vykonat co největší práci za dodání co nejnižší energie ve formě tepla. Na fotografii (obr. 2.7-1) si můžete prohlédnout model takového parního stroje.

Uvážíme-li změnu vnitřní energie systému tepelnou výměnou i konáním práce současně (např. plyn v nádobě s pohyblivým pístem budeme zahřívat a ten bude zvedat píst), dostáváme první termodynamický zákon:

Změna vnitřní energie systému ΔU je rovna rozdílu tepla Q dodaného z okolí do systému a práce W vykonané systémem na okolí, $\Delta U = Q - W$.

První termodynamický zákon je dalším ze zákonů zachování energie. Připomeňme ještě, že jednotkou tepla, práce i vnitřní energie je jeden joule, 1 J.



KO2.7.-1. Které z níže uvedených termodynamických systémů můžeme považovat za

a) otevřené,
b) uzavřené,
c) neizolované,
d) izolované,
e) adiabaticky izolované?

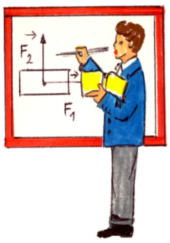
1) čerstvě natřená lavička v parku
2) čaj a vzduch uzavřené v kvalitní termosce
3) limonáda a plyn uzavřené v PET lahvi

KO2.7.-2. Které z následujících veličin jsou veličiny stavové?

a) vnitřní energie,
b) teplota,
c) teplo,
d) objem,
e) hustota,
f) tlak,
g) práce

KO2.7.-3. V rohu hřiště leží v klidu squashový míček. Rozhodněte, kdy způsobíme nezanedbatelnou změnu jeho vnitřní energie. Míček:

a) hodíme spoluhráči
b) položíme na teplý radiátor
c) zvedneme nad hlavu
d) budeme ve hře opakovaně intenzivně odbíjet



Na obrázku 2.7-2 je jednoduché zařízení schopné při dodání tepla vykonat práci (vyzvednout závaží). Nádoba s volně pohyblivým, ale těsnícím pístem je naplněna vodní párou, na pístu je přes pravoúhlé táhlo, nit a kladku upevněno závaží tíhy $G = 100\,\mathrm{N}$. Při dalším ohřívání přijme nádoba s parou teplo $Q = 500\,\mathrm{J}$, píst se přitom posune vpravo o $\Delta s = 5\,\mathrm{cm}$. Jak velkou práci W vodní pára vykonala a jaká přitom byla změna vnitřní energie ΔU soustavy nádoba-vodní pára?

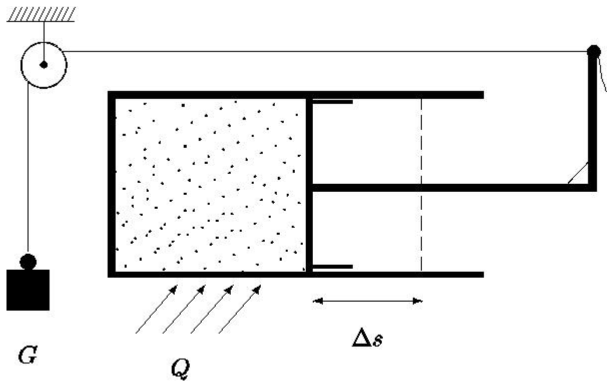
Řešení:

Rozpínající se vodní pára překonává tíhu závaží na pístu, práci lze tedy vypočítat podle vztahu

$W = G\,s = 100 \cdot 5 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{J} = 5\ \mathrm{J}$.

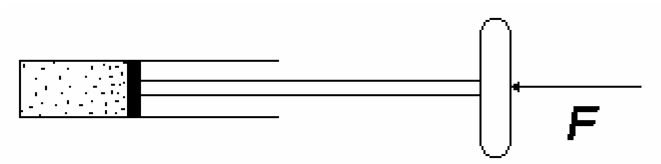
Z první věty termodynamické plyne, že změna vnitřní energie soustavy se rovná rozdílu tepla Q odevzdaného okolními tělesy soustavě a práce W vykonané soustavou na okolí, $\Delta U = Q - W$. Změna její vnitřní energie tedy bude

$\Delta U = Q - W = Q - G\,s = (500 - 5)\ \mathrm{J} = 495\ \mathrm{J}$.



obr. 2.7-2

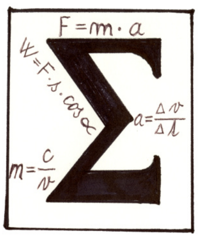
U2.7.-4. Jak se změní vnitřní energie plynu v trubici uzavřené pístem(viz. obr. 2.7-3.), stlačíme-li píst prudce o $\Delta s = 20\,\mathrm{cm}$? Průměrná velikost síly působící na píst byla $F = 50\,\mathrm{N}$. Jak se to projeví?



obr. 2.7-3

U2.7.-5. Jak se změní vnitřní energie tlakového hrnce s vodou, přijme-li od vařiče teplo $Q_1 = 300\,\mathrm{kJ}$ a okolnímu vzduchu předá teplo $Q_2 = 80\,\mathrm{kJ}$? Pojistný ventil po dobu děje neotevřel.

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly. Vodítkem vám mohou být vytýčené studijní cíle.



Termodynamické soustavy rozdělujeme podle toho, zda a v jaké formě si mohou vyměňovat energii nebo částice s okolím, na soustavy otevřené (výměna částic), uzavřené (částice nevyměňují), neizolované (výměna částic nebo energie), izolované (nevyměňují částice ani energii), adiabaticky izolované (nevyměňují energii ve formě tepla).

Vnitřní energie tělesa zahrnuje kinetickou energii neuspořádaného pohybu částic, z nichž je těleso složeno, a jejich vzájemnou potenciální energii. Vnitřní energii tělesa můžeme změnit konáním práce (např. třením tělesa, stlačením plynu) nebo tepelnou výměnou (kontaktem s teplejším nebo chladnějším tělesem).

První termodynamický zákon představuje zákon zachování energie při termodynamických dějích: změna vnitřní energie systému ΔU je rovna rozdílu tepla Q dodaného z okolí do systému a práce W vykonané systémem na okolí, $\Delta U = Q - W$.

2.8 Látka jako soustava částic

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:
1. vysvětlit pojem diskrétní struktura látky
2. stručně porovnat jednotlivá skupenství látek z hlediska jejich vnitřní struktury
3. definovat atomovou hmotnostní konstantu a atomovou (molekulovou) relativní hmotnost, vyhledat atomové relativní hmotnosti prvků v tabulkách a vypočítat pomocí nich klidovou hmotnost určitého atomu nebo molekuly
4. definovat Avogadrovu konstantu a látkové množství včetně jeho jednotky
5. vypočítat, kolik částic je obsaženo v daném látkovém množství látky
6. definovat molární hmotnost a vypočítat pomocí ní hmotnost určitého látkového množství dané látky
7. definovat molární objem a vypočítat pomocí něj objem určitého látkového množství dané látky

90 minut

Kinetická a potenciální energie.

Ujistěte se, že rozumíte pojmům uvedeným jako požadované předběžné znalosti a pak si prostudujte následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených vztahů a definic.

Termodynamika studuje jednotlivé systémy pouze z makroskopického hlediska, bez ohledu na jejich vnitřní strukturu. Chceme-li lépe pochopit některé vlastnosti makroskopických těles, je někdy užitečné k ní přihlédnout. Jak víte již ze základní školy, látka tvořící tělesa kolem nás má diskrétní vnitřní strukturu. Je složena z částic - molekul a atomů, mezi nimiž je prázdný prostor. Částice se v látce neustále neuspořádaně pohybují a navzájem na sebe působí přitažlivými a odpudivými silami. Soustava částic tvořících libovolné těleso má proto kinetickou energii (i pokud se těleso jako celek nepohybuje) a potenciální energii vzájemného působení. Tyto společně tvoří vnitřní energii daného tělesa, se kterou jsme se již setkali v kapitole 2.7.

V plynných látkách jsou za normálních podmínek (teplota 0 °C a tlak 101,325 kPa) střední vzdálenosti mezi jednotlivými molekulami řádově větší než rozměry molekul a vzájemné silové působení mezi nimi je prakticky zanedbatelné. Proto plyn snadno mění svůj tvar i objem. Vnitřní energie plynu je z rozhodující části tvořena kinetickou energií chaotického pohybu molekul. Molekuly se pohybují se stejnou pravděpodobností ve všech směrech a s různě velkými rychlostmi, které se mění v důsledku vzájemných srážek nebo srážek se stěnami nádoby. Čím vyšší je teplota plynu, tím větší je střední rychlost molekul a jejich kinetická energie.

V kapalinách nejsou molekuly tak volně pohyblivé, jejich vzdálenost je řádově srovnatelná s rozměry molekul a jejich vzájemné silové působení nezanedbatelné. Jednotlivé molekuly kapaliny kmitají kolem rovnovážných poloh, které se pomalu mění.V důsledku vzájemného silového působení molekul kladou kapaliny velký odpor stlačování, ale protože stření polohy molekul nejsou stálé, snadno mění tvar. Potenciální energie vzájemného působení je u kapalin srovnatelná s kinetickou energií neuspořádaného pohybu.

V pevných látkách jsou většinou molekuly pravidelně uspořádány, tvoří krystalovou strukturu. Pevné látky, které takovou strukturu nemají (sklo, asfalt), označujeme jako amorfní. Střední vzdálenost je opět řádově srovnatelná s rozměry molekul, jednotlivé molekuly kapaliny neuspořádaně kmitají kolem stálých rovnovážných poloh, výchylka těchto kmitů roste s teplotou. V důsledku silného vzájemného působení molekul kladou pevné látky velký odpor jak stlačování, tak i změně tvaru. Potenciální energie vzájemného působení je u pevných látek větší než kinetická energie neuspořádaného pohybu.

Protože hmotnosti atomů a molekul jsou velmi malé (řádově 10^{-27} až 10^{-24} kg) a běžná tělesa obsahují velmi velké počty (řádově cca 10^{20} a více) molekul, je pro popis těles z hlediska částicové struktury výhodné zavést ještě jiné jednotky než 1 kilogram a 1 částice.

Atomová hmotnostní konstanta je definována jako 1/12 klidové hmotnosti atomu uhlíku ${}^{12}_{6}C$, $m_u = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Patří k základním fyzikálním konstantám.

Numerické hodnoty atomové hmotnostní konstanty ani následujících konstant si pamatovat nemusíte, v případě potřeby si je můžete vždy vyhledat v tabulkách.

Hmotnost atomu nebo molekuly můžeme vyjádřit jako násobek atomové hmotnostní konstanty. Tento násobek nazýváme relativní atomová (molekulová) hmotnost a značíme A_r (M_r). Střední relativní atomové hmotnosti prvků jsou uvedeny v tabulkách.

Klidovou hmotnost daného atomu můžeme vypočítat podle vztahu $m_a = A_r\, m_u$.

Střední relativní molekulovou hmotnost libovolné molekuly vypočteme jako součet relativních atomových hmotností všech atomů, které danou molekulu tvoří. Klidovou hmotnost molekuly pak vypočteme podle $m_m = M_r\, m_u$.

Pro popis systémů zahrnujících velké množství částic zavedeme novou veličinu, kterou nazveme látkové množství (n), její jednotka 1 mol je základní jednotkou SI:

Mol je látkové množství soustavy, která obsahuje právě tolik částic, kolik je atomů v nuklidu uhlíku $^{12}_{6}C$ o hmotnosti 0,012 kg.

Tento počet částic vyjadřuje tzv. Avogadrova konstanta, N_A = 6,022 · 10^{23} mol^{-1}. Patří také k základním fyzikálním konstantám. Látkové množství udává počet částic v násobcích Avogadrovy konstanty.

Známe-li látkové množství n např. molekul plynu v nádobě, určíme jejich počet N ze vztahu:

$$N = nN_A .$$

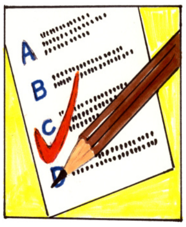
Mluvíme-li bez dalšího vysvětlení o určitém látkovém množství plynu, máme obvykle na mysli látkové množství jeho molekul, nikoli jednotlivých atomů. To je třeba si uvědomit pro běžné plyny jako vodík H_2, kyslík O_2 či dusík N_2.

Veličina molární hmotnost udává hmotnost jednoho molu dané látky, je tedy definována vztahem $M_m = \frac{m}{n}$, kde m je hmotnost látky a n její látkové množství.

Molární hmotnosti molekul běžných sloučenin jsou uvedeny v tabulkách, přibližně je lze také vypočítat na základě jejich chemického vzorce (viz. řešený příklad).

Veličina molární objem udává objem jednoho molu dané látky za daných podmínek, je tedy definována vztahem $V_m = \frac{V}{n}$, kde V je objem látky a n její látkové množství.

Za normálních podmínek (teplota 0 °C a tlak 101,325 kPa) je molární objem pro všechny plyny stejný, nazývá se normální molární objem, $V_{mn} = 22{,}414 \cdot 10^{-3}\,m^3 mol^{-1}$ další ze základních fyzikálních konstant.



KO2.8.-1. Pokuste se znovu si vybavit (zpaměti) definice níže uvedených veličin. Pro případ plynného tělesa rozhodněte, která z nich bude na rozdíl od ostatních silně záviset na stavu, v němž se těleso nachází (na teplotě, tlaku atp.).

a) relativní atomová hmotnost
b) relativní molekulová hmotnost
c) molární hmotnost
d) molární objem

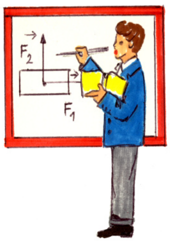
KO2.8.-2. Atomová relativní hmotnost vodíku je přibližně rovna jedné, atomová relativní hmotnost helia čtyřem. Vodík tvoří dvouatomové, helium jednoatomové molekuly. Která z následujících tvrzení jsou pravdivá ?

a) 1 mol He má přibližně čtyřikrát větší hmotnost než jeden mol H_2.
b) 1 mol He má přibližně dvakrát větší hmotnost než jeden mol H_2.
c) Stejná látková množství mají stejnou hmotnost.
d) Za normálních podmínek (0 °C, 101,325 kPa) je objem jednoho molu helia větší.
e) Za normálních podmínek má helium větší hustotu.

KO2.8.-3. Doplňte následující tabulku srovnávající tělesa jednotlivých skupenství z hlediska jejich makroskopických a mikroskopických vlastností. Vybírejte z nabízených možností (některé lze použít i vícekrát).

skupenství	pevné	kapalné	plynné
tvar těles	1	2	3
objem těles	4	5	6
střední vzdálenosti molekul v porovnání s jejich rozměry	7	8	9
proměnlivost polohy molekul	10	11	12
podíl kinetické a potenciální energie na vnitřní energii	13	14	15

a) střední poloha zvolna proměnlivá
b) převažuje kinetická
c) střední poloha stálá
d) proměnný
e) poloha nestálá
f) stálý
g) velmi velké
h) řádově srovnatelné
i) převažuje potenciální



V kontejneru o objemu 90 litrů se nachází za tzv. normálních podmínek (teplota $0\ ^\circ\mathrm{C}$, tlak 101,325 kPa) oxid uhličitý. Postupně určete:

a) jaké je jeho látkové množství,

b) kolik je to molekul,

c) hmotnost jedné molekuly oxidu uhličitého,

d) molární hmotnost oxidu uhličitého

e) celkovou hmotnost plynu, nacházejícího se v kontejneru.

Atomové relativní hmotnosti atomů tvořících molekulu oxidu uhličitého naleznete v periodické tabulce prvků, další potřebné konstanty si vyhledejte v textu nebo v tabulkách.
Řešení:

---

a) Za normálních podmínek zaujme jeden mol libovolného plynu vždy stejný, tzv. normální molární objem, $V_{\mathrm{mn}} = 22{,}414\ \mathrm{l \cdot mol^{-1}}$. Objem nádoby $V = 90\ \mathrm{l}$, látkové množství plynu tedy bude

$$n = \frac{V}{V_{\mathrm{mn}}} = \frac{90}{22{,}414}\,\mathrm{mol} \doteq 4\,\mathrm{mol}.$$

b) Jeden mol látky obsahuje Avogadrovu konstantu molekul, celkový počet molekul tedy bude

$$N = n \cdot N_{\mathrm{A}} = 4 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} \doteq 24 \cdot 10^{23}.$$

c) Oxid uhličitý má chemický vzorec CO_2. V periodické soustavě nalezneme atomové relativní hmotnosti uhlíku $A_{\mathrm{rC}} \doteq 12$ a kyslíku $A_{\mathrm{rO}} \doteq 16$. Vyjádříme molekulovou relativní hmotnost molekuly oxidu uhličitého: $M_{\mathrm{r}} = A_{\mathrm{rC}} + 2A_{\mathrm{rO}} = 12 + 2 \cdot 16 = 44$. Pomocí atomové hmotnostní konstanty m_{u} pak vypočteme hmotnost jedné molekuly podle vztahu

$$m_m = M_r \cdot m_u = 44 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 7{,}3 \cdot 10^{-26}\ \text{kg}$$

d) Molární hmotnost oxidu uhličitého vypočteme pomocí předchozího výsledku jako počet molekul v jednom molu látky krát hmotnost jedné molekuly

$$M_m = N_A \cdot m_m = 6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 7{,}3 \cdot 10^{-26}\ \text{kg mol}^{-1} = 44\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Poznámka: Všimněte si, že molární hmotnost určitého plynu udaná v jednotce g mol^{-1} je numericky shodná s jeho molekulovou relativní hmotností. To není náhoda, platí totiž:

$$M_m = \frac{m}{n} = \frac{m_u M_r N}{n} = m_u N_A M_r, \text{ přitom}$$

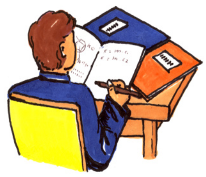
$$m_u N_A = \left(\frac{1}{12} \text{hmotnosti molekuly } {}^{12}_{6}\text{C}\right) \cdot (\text{počet molekul v 12g}) =$$

$$= (\text{hmotnost 1 molekuly } {}^{12}_{6}\text{C}) \cdot (\text{počet molekul v 1g}) = 1\ \text{g}.$$

Molární hmotnosti běžných molekul lze také přímo najít v tabulkách.

e) Celkovou hmotnost plynu pak můžeme určit podle

$$m = M_m \cdot n = 44 \cdot 4\ \text{g} = 176\ \text{g} = 0{,}176\ \text{kg}.$$

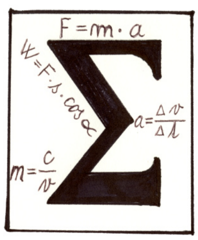


U2.8.-4. Pomocí údajů uvedených v periodické soustavě prvků určete relativní molekulovou a molární hmotnost vody.

U2.8.-5. S využitím výsledku předchozí úlohy určete, jaké látkové množství představuje 1 kg vody. Kolik je to molekul?

U2.8.-6. Jaká je hustota vzduchu za normálních podmínek? Molární hmotnost vzduchu buď nalezněte v tabulkách, nebo ji přibližně určete na základě znalosti jeho složení a atomových relativních hmotností jednotlivých prvků. Vzduch ve spodních vrstvách atmosféry obsahuje 78 % molekul dusíku N_2, 21 % molekul kyslíku O_2 a téměř 1 % molekul argonu A_r.

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly, zejména nezapomeňte na nově zavedené veličiny a vztahy mezi nimi. Vodítkem vám mohou být studijní cíle stanovené na začátku kapitoly.



Látka tvořící tělesa kolem nás má diskrétní strukturu, je složena z velmi velkého množství atomů a molekul.

Atomová hmotnostní konstanta je definována jako 1/12 klidové hmotnosti atomu uhlíku ${}^{12}_{6}\text{C}$. Relativní atomová (molekulová) hmotnost udává podíl hmotnosti atomu (molekuly) a atomové hmotnostní konstanty. Atomovou hmotnostní konstantu m_u a relativní atomovou hmotnost A_r daného prvku lze nalézt v tabulkách a hmotnost atomu pak vypočítat podle vztahu $m_a = A_r m_u$.

Avogadrova konstanta N_A udává počet částic v 1 molu látky a je uvedena v tabulkách. Mol je látkové množství soustavy, která obsahuje právě tolik částic, kolik je atomů v nuklidu uhlíku ${}^{12}_{6}\text{C}$ o hmotnosti 0,012 kg. Počet částic N v látce o látkovém množství n je $N = n N_A$.

Molární hmotnost M_m udává hmotnost jednoho molu dané látky, hmotnost m látky o látkovém množství n vypočteme jako $m = M_m n$.

Molární objem V_m udává objem jednoho molu dané látky za daných podmínek, objem V látky o látkovém množství n vypočteme jako $V = V_m n$. Za normálních podmínek je pro všechny plyny stejný.

2.9 Ideální plyn, stavová rovnice

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. shrnout, jaké vlastnosti předpokládáme u molekul ideálního plynu
2. kvalitativně popsat, jak souvisí teplota ideálního plynu s rychlostí pohybu jeho molekul
3. kvalitativně popsat, jak závisí vnitřní energie ideálního plynu na teplotě
4. kvalitativně vysvětlit původ tlaku plynu z hlediska jeho částicové struktury
5. napsat stavovou rovnici ideálního plynu
6. vyjádřit stavovou rovnici a zakreslit p-V diagram pro děj izotermický, izochorický a izobarický
7. řešit jednoduché úlohy využívající stavové rovnice ideálního plynu

90 minut

Rychlost, kinetická energie, hybnost, pružná srážka, tlak /2.1/, teplota /2.5/, termodynamický stav systému /2.7/, látkové množství /2.8/.

Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

V této kapitole se budeme zabývat změnami termodynamického stavu plynného tělesa pro případ tzv. ideálního plynu. Jak již název napovídá, jde o idealizovaný model. Za běžných podmínek (teplota kolem 300 K, tlak kolem hodnoty běžného atmosférického tlaku 100 kPa) můžeme ale chování reálného plynu popsat pomocí tohoto modelu s dobrou přesností.

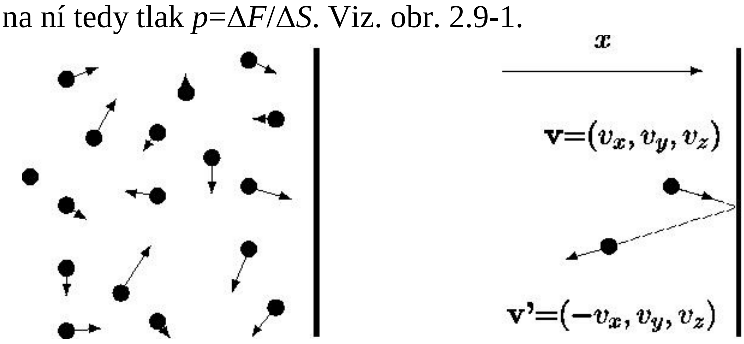
Předpokládáme, že molekuly ideálního plynu mají zanedbatelné rozměry, mimo srážky na sebe nepůsobí, srážky molekul se stěnami nádoby a mezi molekulami navzájem jsou dokonale pružné.

Z předpokladu, že molekuly ideálního plynu na sebe mimo srážky nepůsobí, také plyne, že vnitřní energie ideálního plynu je tvořena pouze vnitřní energií kinetickou, související s neuspořádaným pohybem molekul. Jednotlivé molekuly se pohybují různými rychlostmi co do směru i velikosti, tyto rychlosti se při srážkách mění. Co do směru je rozložení rychlostí rovnoměrné. Je-li plynné těleso z makroskopického pohledu v klidu, pohybuje se ve všech směrech v libovolném okamžiku zhruba stejný počet molekul. Rozložení rychlostí co do velikosti rovnoměrné není, jen málo molekul se pohybuje velmi rychle nebo velmi pomalu. S rostoucí teplotou plynu rychlosti molekul rostou. Pokud bychom vypočítali střední hodnotu kvadrátu velikosti rychlosti všech molekul, zjistili bychom, že je (za běžných podmínek) přímo úměrná teplotě plynu. Protože kinetická energie jednoatomové molekuly o hmotnosti m a velikosti rychlosti v je rovna $E_k = \frac{1}{2}mv^2$, bude i vnitřní energie plynu tvořeného jednoatomovými molekulami přímo úměrná teplotě. K analogickému výsledku bychom dospěli i pro plyny tvořené víceatomovými molekulami, k jejichž vnitřní energii přispívá ještě energie rotační. Vnitřní energie ideálního plynu je za běžných podmínek přímo úměrná jeho teplotě.

Nyní si přiblížíme původ tlaku plynu z mikroskopického hlediska. Následující výklad se rozhodně nepokoušejte naučit zpaměti, ale snažte se jej pochopit.

Představme si ideální plyn uzavřený v nádobě. Plyn je tvořen velkým počtem molekul, které nádobu rovnoměrně vyplňují a pohybují se ve všech možných směrech. Tlak na stěnu nádoby (nebo libovolnou jinou plošku, kterou bychom mohli do nádoby vsunout) vzniká v důsledku nárazů jednotlivých molekul na tuto stěnu. Z definice víte, že tlak je roven podílu tlakové síly a plochy, na niž tato síla působí. Podívejme se třeba na stěnu kolmou k ose x. Molekula o hmotnosti m a rychlosti $\mathbf{v}=(v_x, v_y, v_z)$, změní při pružné srážce s pevnou stěnou nádoby svou rychlost na $\mathbf{v}'=(-v_x, v_y, v_z)$.

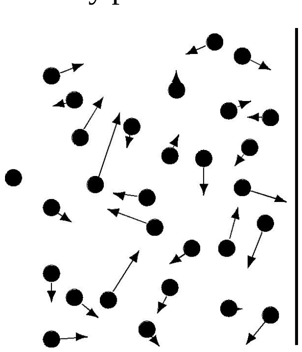
Její x-ová složka hybnosti se změní o $\Delta p=2mv_x$. Tato změna hybnosti je způsobena silou, kterou po dobu srážky působí na molekulu stěna nádoby. Podle zákona akce a reakce působí po stejnou dobu molekula na stěnu silou stejně velkou, ale opačně orientovanou. Protože je v nádobě velmi velký počet molekul, působí zde na libovolnou plošku ΔS časově prakticky konstantní výsledná tlaková síla $\Delta \boldsymbol{F}$ a naměříme na ní tedy tlak $p=\Delta F/\Delta S$. Viz. obr. 2.9-1.

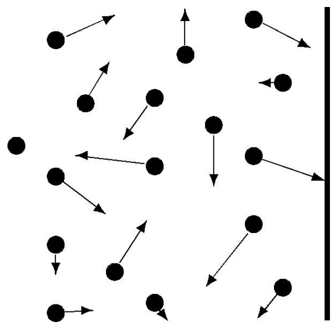


obr. 2.9-1 Změna hybnosti částice nárazem

Je zřejmé, že bude-li ve stejné nádobě při stejné teplotě větší počet molekul, vzroste i počet jejich nárazů na stěnu za časovou jednotku a v důsledku toho i tlak. Podobně zmenšíme-li objem nádoby při zachování počtu molekul. Viz. obr. 2.9-2.

Tlak v nádobě vzroste i tehdy, pokud při stejném objemu a počtu částic plyn zahřejeme. Pak vzroste průměrná rychlost molekul a za časovou jednotku jich jednak opět stihne dorazit ke stěně a narazit na ni více, jednak bude i větší průměrná změna jejich hybnosti a tedy i síla, kterou na stěnu během srážky působí. Viz. obr. 2.9-3.





obr. 2.9-2 Větší hustota molekul v nádobě   obr. 2.9-3 Vyšší teplota a tedy i rychlosti molekul

Kvantitativní rozbor založený na výše uvedených úvahách (který ovšem přesahuje rámec přípravného kurzu a seznámíte se s ním až v základním kurzu vysokoškolské fyziky) vede k následujícímu výsledku, nazvanému stavová rovnice ideálního plynu.

Pro ideální plyn o látkovém množství n, objemu V, tlaku p a termodynamické teplotě T platí

$$pV = nRT ,$$

kde R je tzv. molární plynová konstanta, R = 8,31 $\mathrm{JK^{-1}mol^{-1}}$ (patří k základním fyzikálním konstantám).

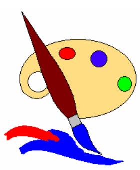
Pozor! Všimněte si, že ve stavové rovnici vystupuje termodynamická teplota T (v kelvinech), nelze ji zaměnit teplotou *t* uváděnou ve ºC! To je častou chybou při řešení úloh.

Hodnotu molární plynové konstanty si nemusíte pamatovat, v případě potřeby ji snadno naleznete v tabulkách.

K analogickému výsledku lze dospět na základě makroskopického přístupu prostřednictvím experimentů, prováděných na plynných tělesech. Fyzikové se jimi zabývali již od 17. století.

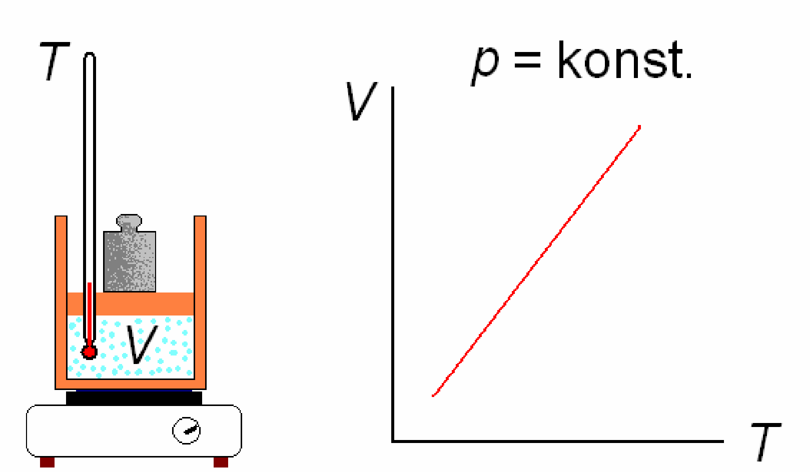
Jak již víte z kapitoly 2.6 věnované teplotní roztažnosti pevných látek a kapalin, změna objemu těles těchto skupenství je prakticky jednoznačně určena změnou jejich teploty. Ze stavové rovnice ideálního plynu je zřejmé, že u plynných těles je situace složitější. I tehdy, budeme-li studovat pouze uzavřené systémy (nedochází k výměně částic s okolím, viz 2.7), stále ještě ve stavové rovnici vystupují tři proměnné veličiny – tlak, objem a teplota. Pro úplný popis termodynamických dějů v plynech je proto třeba blíže specifikovat, jakým způsobem děj probíhal. Nejjednodušší je popis dějů, při nichž je některá z výše uvedených veličin konstantní. Tyto případy jsou:

1) děj izobarický, tj. probíhající za konstantního tlaku,
2) děj izochorický, tj. probíhající za konstantního objemu,
3) děj izotermický, tj. probíhající za konstantní teploty.



Děj izobarický

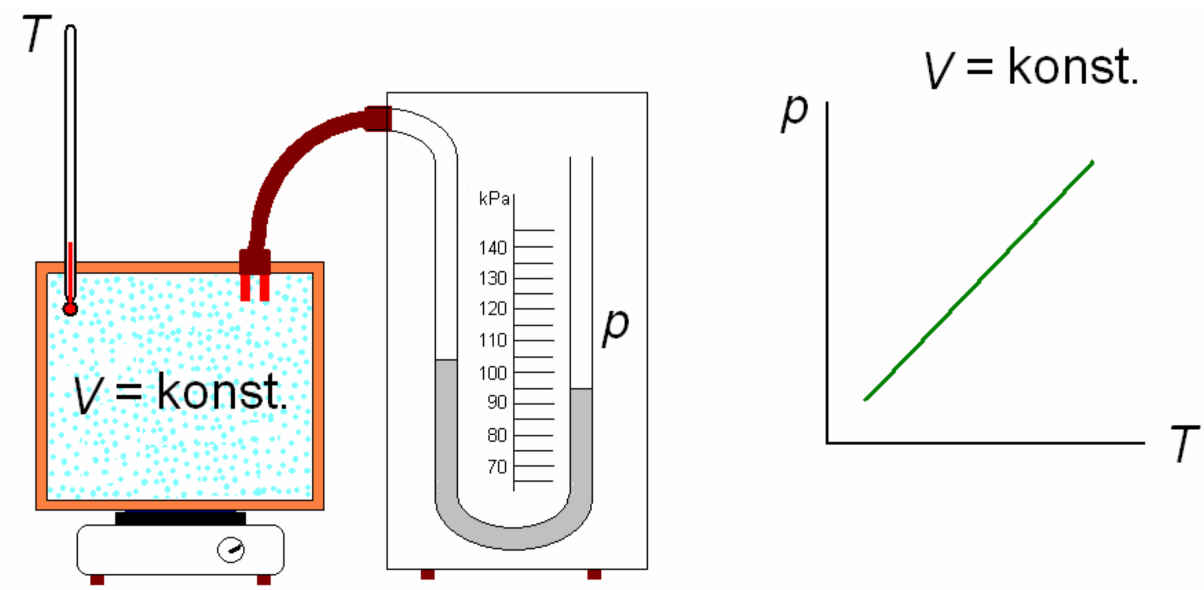
Izobarický děj je děj, při němž se nemění tlak plynového tělesa, p = konst. Lze jej realizovat například tak, že plyn uzavřeme v nádobě s pístem, který je volně pohyblivý ve svislém směru, ale přitom dobře těsní. Hodnotu požadovaného tlaku můžeme regulovat zatížením pístu. Jak se bude měnit teplota a objem plynu, začneme-li mu dodávat teplo?



Při experimentu na obrázku bychom pozorovali současný nárůst teploty a objemu plynového tělesa. Ze stavové rovnice $pV = nRT$ plyne, že při konstantním tlaku bude objem plynového tělesa růst přímo úměrně teplotě.

Děj izochorický

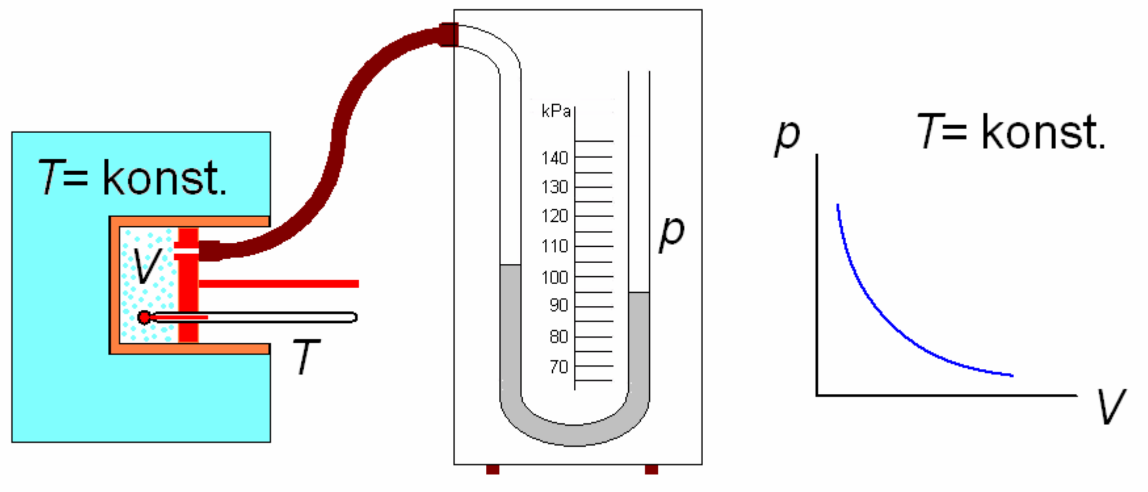
Izochorický děj je děj, při němž se nemění objem plynového tělesa, V = konst. Lze jej realizovat tak, že plyn uzavřeme do nádoby s pevnými stěnami. Jak se bude měnit teplota a tlak plynu, začneme-li mu dodávat teplo?



Při zahřívání plynového tělesa v uspořádání na obrázku bychom pozorovali nárůst tlaku – kapalina v manometru by se přesouvala do otevřeného ramene. Ze stavové rovnice $pV = nRT$ plyne, že při konstantním objemu bude tlak plynového tělesa růst přímo úměrně teplotě.

Děj izotermický

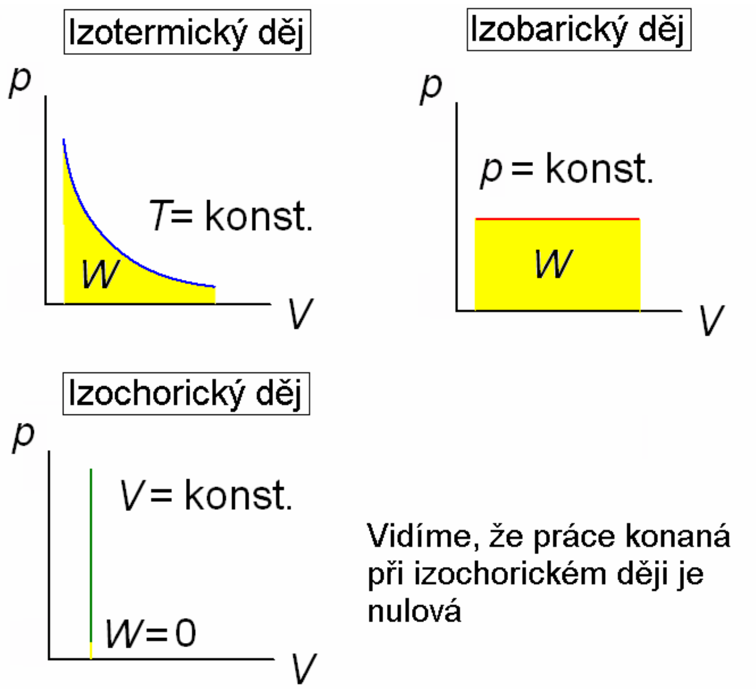
Izotermický děj je děj, při němž se nemění teplota plynového tělesa, T = konst. Lze jej realizovat tak, že nádoba s plynem je v tepelném kontaktu s termostatem a děj probíhá dostatečně pomalu na to, aby se teplota plynu stačila neustále vyrovnávat s teplotou termostatu. Jak se bude měnit tlak plynu, budeme-li například tahem pístu zvětšovat jeho objem?

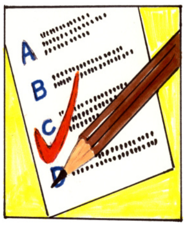


Ze stavové rovnice $pV = nRT$ plyne, že při konstantní teplotě tlaku bude tlak plynového tělesa klesat nepřímo úměrně jeho objemu.

p -*V* diagramy

U izotermického děje jsme zobrazovali závislost tlaku na objemu, tzv. $p - V$ diagram. Ten je užitečný pro výpočet účinnosti termodynamických zařízení, protože plocha pod křivkou odpovídá práci, jakou rozpínající se plyn vykonal na svém okolí. Jak bude vypadat $p - V$ diagram pro izobarický a izochorický děj?



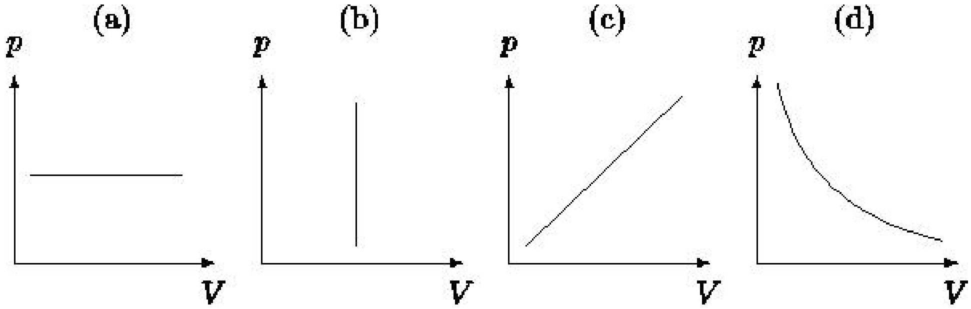


KO2.9.-1. Jak bude vypadat stavová rovnice, ve které bude místo látkového množství n vystupovat počet částic N? Využijte toho, že molární plynovou konstantu R lze vyjádřit jako součin dvou jiných základních konstant: Avogadrovy konstanty $N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ mol^{-1} a Boltzmannovy konstanty $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ JK^{-1}, tedy $R = N_A\, k$.

KO2.9.-2. Pomocí stavové rovnice určete, jak se bude měnit objem v závislosti na teplotě u izobarického děje v ideálním plynu a jak bude pro daný děj vypadat graf závislosti tlaku na objemu neboli p-V diagram. Vybírejte z následujících možností:

A) objem s teplotou nesouvisí
B) objem je nepřímo úměrný teplotě
C) objem je přímo úměrný teplotě
D) objem se nemění

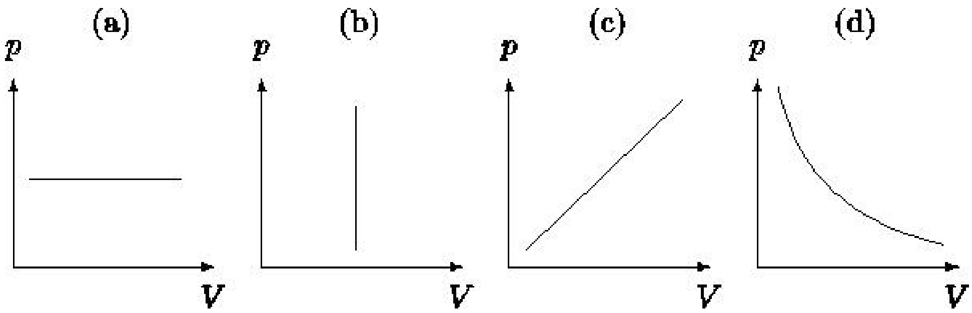
a)– d)



KO2.9.-3. Pomocí stavové rovnice určete, jak se bude měnit tlak v závislosti na teplotě u izochorického děje v ideálním plynu a jak bude pro daný děj vypadat p-V diagram. Vybírejte z následujících možností:

A) tlak s teplotou nesouvisí
B) tlak je nepřímo úměrný teplotě
C) tlak je přímo úměrný teplotě
D) tlak se nemění

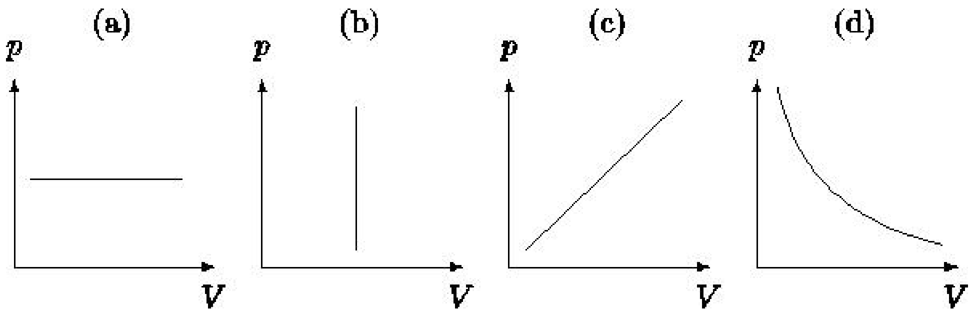
a)– d)

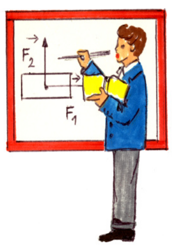


KO2.9.-4. Pomocí stavové rovnice určete, jak se bude měnit tlak v závislosti na objemu u izotermického děje v ideálním plynu a jak bude pro daný děj vypadat p-V diagram. Vybírejte z následujících možností:

A) tlak s objemem nesouvisí
B) tlak je nepřímo úměrný objemu
C) tlak je přímo úměrný objemu
D) tlak se nemění

a)– d)





Jak se změní objem ideálního plynu uzavřeného v nádobě s pohyblivým pístem, jestliže jeho teplota vzroste izobaricky z $t_1 = 27\ ^\circ\mathrm{C}$ na $t_2 = 127\ ^\circ\mathrm{C}$? Řešení:

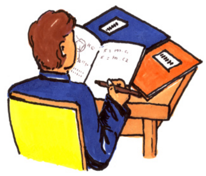
Izobarický děj je děj, při kterém je tlak plynu konstantní. Ze stavové rovnice pak plyne, že

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2},$$

kde T_1 a T_2 jsou počáteční a koncová termodynamická teplota plynu. Platí $T = (\{t\} + 273{,}15)\,\mathrm{K}$, odtud plyne, že $T_1 \doteq 300\,\mathrm{K}$, $T_2 \doteq 400\,\mathrm{K}$. Pak

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{400}{300} = \frac{4}{3}.$$

Objem plynu vzroste o třetinu.



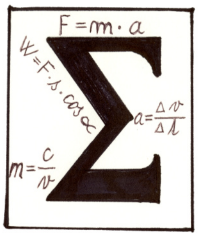
U2.9.-5. V nádobě uzavřené pístem je $V_1 = 5\ \mathrm{l}$ vzduchu o teplotě $t_1 = 27\ ^\circ\mathrm{C}$ a tlaku $p_1 = 100\,\mathrm{kPa}$. Jak vzroste tlak vzduchu, jestliže jeho objem stlačíme na polovinu a teplota přitom vzroste na $t_2 = 37\ ^\circ\mathrm{C}$?

U2.9.-6. Jaký bude tlak vzduchu v raftovém člunu, vyhřeje-li se na slunci na $50\ ^\circ\mathrm{C}$, když při $17\ ^\circ\mathrm{C}$ byl 450 kPa? Rozměry komor se mění jen zanedbatelně.

U2.9.-7. V tlakové nádobě s kyslíkem (O_2) je při teplotě $17\ ^\circ\mathrm{C}$ tlak $900\,\mathrm{kPa}$. Vnitřní objem nádoby je 20 l. Jaká je hmotnost kyslíku? Potřebné údaje vyhledejte v tabulkách.

U2.9.-8. Ukažte, že za normálních podmínek (teplota $0\ ^\circ\mathrm{C}$, tlak $101{,}325\,\mathrm{kPa}$) je skutečně objem jednoho molu ideálního plynu roven normálnímu molárnímu objemu $V_{mn} = 22{,}414\ \mathrm{l{\cdot}mol^{-1}}$. Jako výsledek doplňte teoretický vztah, odkud po dosazení tuto hodnotu získáte.

Nyní stručně shrňte nejdůležitější body této kapitoly s ohledem na studijní cíle stanovené v úvodu.



U modelu ideálního plynu předpokládáme, že jeho molekuly mají zanedbatelné rozměry, mimo srážky na sebe nepůsobí, srážky molekul se stěnami nádoby a mezi molekulami navzájem jsou dokonale pružné. Tento model lze s dobrou přesností použít pro plyny za běžných podmínek.

Čím je větší teplota plynu, tím větší je i střední velikost rychlosti neuspořádaného pohybu jeho molekul.

Vnitřní energie ideálního plynu je za běžných podmínek přímo úměrná jeho teplotě.

Tlak plynu na stěny nádoby je způsoben neustálými nárazy molekul plynu na tyto stěny. Roste s počtem molekul v objemové jednotce nádoby a s velikostí rychlostí molekul, tedy i s teplotou. Tuto závislost udává stavová rovnice ideálního plynu: $pV=nRT$, kde p je tlak plynu, V jeho objem, R molární plynová konstanta, n látkové množství a T termodynamická teplota.

Při izobarickém ději je tlak p konstantní, odtud pro uzavřené soustavy plyne, že i V/T= konst. Při izochorickém ději je objem V konstantní, odtud pro uzavřené soustavy plyne, že i p/T = konst. Při izotermickém ději je konstantní teplota T, v uzavřeném systému pak platí pV = konst., tlak je nepřímo úměrný teplotě.

2.10 Tepelná kapacita

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

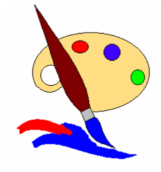
1. vysvětlit, co udává veličina nazvaná tepelná kapacita a k čemu se vztahuje
2. vysvětlit, co rozumíme měrnou tepelnou kapacitou a molární tepelnou kapacitou a k čemu se tyto veličiny vztahují
3. definovat měrnou izochorickou a izobarickou tepelnou kapacitu plynu a vysvětlit, proč je třeba je rozlišovat
4. vyhledat měrné tepelné kapacity různých látek v tabulkách
5. umět pro konkrétní případy, kdy nedochází ke změně skupenství, sestavit kalorimetrickou rovnici a řešit příslušné úlohy

60 minut

Teplota /2.5/, vnitřní energie a její změna konáním práce a výměnou tepla /2.7/, první rovnice termodynamiky /2.7/, závislost vnitřní energie ideálního plynu na teplotě /2.9/, stavová rovnice ideálního plynu /2.9/

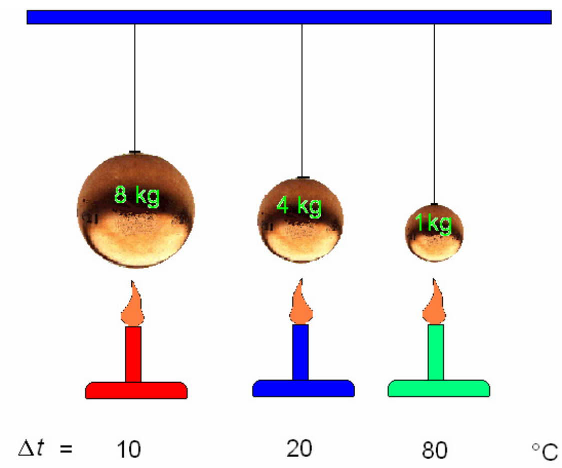
Poté, co jste se ujistili o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

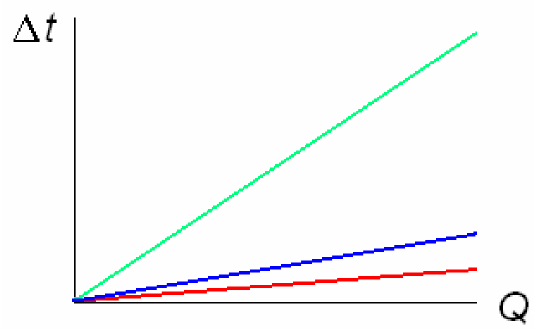
V kapitole /2.7/ jsme se seznámili s veličinou nazvanou vnitřní energie a možnostmi její změny konáním práce a tepelnou výměnou. Víte již, že přijme-li těleso teplo od jiného tělesa, jeho vnitřní energie vzroste a to se projeví nárůstem jeho teploty (ponechejme zatím stranou možnost změny skupenství látek, jíž je věnována následující kapitola). Nejsou-li teplotní rozdíly příliš velké, lze experimentálně prokázat, že nárůst teploty tělesa je přímo úměrný přijatému teplu. Při stejném přijatém teple nebude ale nárůst teploty různých těles stejný.



Tepelná kapacita a měrná tepelná kapacita

Budeme-li zahřívat tři tělesa ze stejného materiálu, ale různé hmotnosti, nárůst jejich teploty při stejném dodaném teple bude různý. Je to způsobeno tím, že mají různou tepelnou kapacitu $C_1 > C_2 > C_3$. Tepelná kapacita je definována vztahem $C = \dfrac{Q}{\Delta t}$, zahřeje-li se při stejném dodaném teple první těleso o 10°C, druhé o 20°C a třetí o 80°C, z definice tepelné kapacity plyne, že $C_1 = 2C_2 = 8C_3$.





Pokud bychom chtěli všechna tělesa zahřát o stejnou teplotu, museli bychom prvnímu tělesu dodat dvakrát více tepla než druhému a osmkrát více než třetímu. Pro praktické účely je výhodné definovat měrnou tepelnou kapacitu, která udává množství tepla potřebné k ohřátí 1 kg dané látky o 1°C. Je to charakteristika materiálu, nikoli tělesa.

Tepelná kapacita vyjadřuje, jaké teplo musíme dodat určitému tělesu, aby se jeho teplota zvýšila o 1 ˚C (o 1 K).

Chceme-li zvýšit teplotu tělesa o tepelné kapacitě C o Δt, musíme mu dodat teplo $Q = C\Delta t$. Tepelná kapacita charakterizuje určité těleso a závisí na druhu materiálu, který těleso tvoří, a jeho množství.

Tepelná kapacita tělesa z určitého materiálu je přímo úměrná jeho hmotnosti. Proto je užitečné definovat veličinu nazvanou měrná tepelná kapacita.

Měrná tepelná kapacita materiálu udává, jaké teplo musíme dodat na 1 kg tělesa z tohoto materiálu, aby se jeho teplota zvýšila o 1 ˚C (o 1 K).

Chceme-li zvýšit teplotu tělesa o hmotnosti *m*, tvořeného materiálem o měrné tepelné kapacitě *c* o Δt, musíme mu dodat teplo $Q = mc\Delta t$. Měrná tepelná kapacita charakterizuje určitý materiál. V tabulkách lze nalézt její hodnotu pro různé pevné látky nebo kapaliny.

Místo tepelné kapacity vztažené na jednotku hmotnosti můžeme zavést tepelnou kapacitu vztaženou na 1 mol. Tu nazýváme molární tepelná kapacita.

Molární tepelná kapacita udává, jaké teplo musíme dodat 1 molu dané látky, aby se její teplota zvýšila o 1 ˚C (o 1 K).

Až dosud jsme neuvažovali o tom, že tepelná kapacita může záviset i na průběhu děje, při kterém dochází k výměně tepla mezi tělesem a okolím. S tímto přístupem za běžných podmínek (normálního tlaku) vystačíme u pevných a kapalných těles. U plynných těles, která snadno mění svůj objem, je situace složitější. Jinou tepelnou kapacitu změříme, budeme-li zahřívat plyn uzavřený v pevné nádobě, a jinou, budeme-li jej zahřívat v nádobě s pohyblivým pístem. Je to proto, že ve druhém případě bude jen část přijatého tepla využita ke změně vnitřní energie plynu, nezanedbatelná část bude spotřebována na konání práce. Připomeňme si zde první termodynamický zákon z kapitoly 2.7: změna vnitřní energie systému ΔU je rovna rozdílu tepla Q dodaného z okolí do systému a práce W vykonané systémem na okolí, $\Delta U = Q - W$.

Věnujme se dále ideálnímu plynu. Je zřejmé, že nemá smysl mluvit o tepelné kapacitě plynu u děje adiabatického (systém nevyměňuje teplo s okolím) ani izotermického (teplota systému je konstantní).

Při izochorickém ději je objem plynu konstantní, plyn nekoná práci a z prvního termodynamického zákona pak plyne, že veškeré přijaté teplo Q je využito k nárůstu vnitřní energie systému ΔU (přímo úměrnému nárůstu teploty Δt). Pak bude platit $Q = \Delta U = c_{\mathrm{v}}\, m\Delta t$, kde m je hmotnost plynu a c_{v} jeho měrná tepelná kapacita při izochorickém ději (měrná izochorická tepelná kapacita). Hodnoty měrné izochorické tepelné kapacity pro různé plyny lze nalézt v tabulkách.

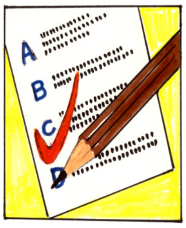
Pokud budeme plyn zahřívat izobaricky, tedy při konstantním tlaku, bude se rozpínat (ověřte si, že to plyne ze stavové rovnice!). Může například působením tlakové síly posouvat vzhůru pohyblivý píst. Přitom koná práci W, na kterou spotřebuje část dodaného tepla, pouze část tepla využije k nárůstu své vnitřní energie o ΔU. Proto při tomto ději bude stejný plyn na ohřátí o stejnou teplotu Δt potřebovat dodat více tepla $Q = \Delta U + W = c_{\mathrm{p}} m\Delta t$, kde c_{p} je měrná izochorická tepelná kapacita daného plynu. Vždy bude platit $c_{\mathrm{p}} > c_{\mathrm{v}}$. Hodnoty měrné izobarické tepelné kapacity pro různé plyny lze opět nalézt v tabulkách.

Zařízení zachycené na fotografii umožňuje měřit tepelné kapacity různých těles a tedy i určovat měrné tepelné kapacity různých látek, nazývá se kalorimetr. Je to tepelně izolovaná nádoba opatřená míchačkou a teploměrem (směšovací kalorimetr), případně i topnou spirálou a zařízením měřícím dodávaný příkon (elektrický kalorimetr, obr. 2.10-1).

obr. 2.10-1

Směšovací kalorimetr je založen na tom, že kalorimetr a tělesa v něm umístěná si vyměňují teplo pouze mezi sebou a že tedy celkové teplo přijaté tělesy na počátku chladnějšími je rovno teplu odevzdanému tělesy na počátku teplejšími.

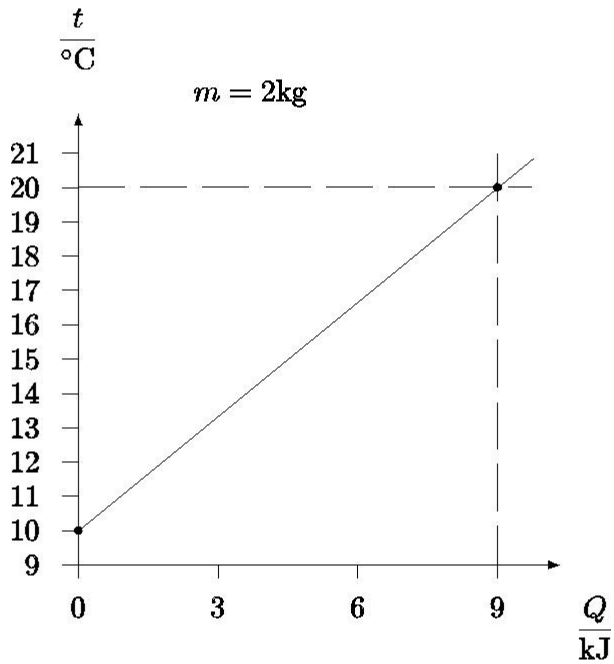
Jeho princip a metodu sestavení kalorimetrické rovnice blíže ilustruje řešený příklad. V případě elektrického kalorimetru je teplo přijaté kalorimetrem a tělesy v něm umístěnými rovno energii dodané prostřednictvím topné spirály. Sestavit kalorimetrickou rovnici pro tento případ byste již měli zvládnout sami.



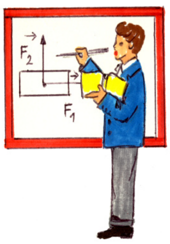
KO2.10.-1. Z následujících možností vyberte správné. Tepelná kapacita
a) charakterizuje určitý materiál
b) charakterizuje určité těleso
c) je při daném materiálu přímo úměrná hmotnosti tělesa
d) je přímo úměrná teplotě tělesa
e) má jednotku $\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$

KO2.10.-2. Z následujících možností vyberte správné. Měrná tepelná kapacita
a) charakterizuje určitý materiál
b) charakterizuje určité těleso
c) je při daném materiálu přímo úměrná hmotnosti tělesa
d) je přímo úměrná teplotě tělesa
e) může být udávána v jednotkách $\mathrm{m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}}$

KO2.10.-3. Podívejte se na graf zachycující vývoj teploty pevného tělesa o hmotnosti 2 kg v závislosti na dodaném teplu. Jaká je jeho tepelná kapacita a měrná tepelná kapacita? Viz. obr. 2.10-2.



obr. 2.10-2



Do kalorimetru o tepelné kapacitě $C = 200\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$ nalijeme $V_1 = 0{,}25\,\mathrm{l}$ vody. Teplota kalorimetru a vody je $t_1 = 20\,^\circ\mathrm{C}$. Na jaké teplotě se soustava ustálí, přidáme-li do kalorimetru měděné závaží o hmotnosti $m_2 = 500\,\mathrm{g}$ a teplotě $t_2 = 50\,^\circ\mathrm{C}$? Řešení:

Kalorimetr, voda a závaží si vyměňují teplo pouze mezi sebou. Závaží, které je na počátku teplejší, předá teplo o velikosti Q_2, voda a kalorimetr přijmou teplo o velikosti Q_1 a Q. Ze zákona zachování energie plyne, že $Q_2 = Q_1 + Q$. Označme neznámou výslednou teplotu *t*. Pak $Q = C(t - t_1)$, $Q_1 = c_1 m_1 (t - t_1)$ a $Q_2 = c_2 m_2 (t_2 - t)$, kde c_1 a c_2 jsou měrné tepelné kapacity vody a mědi, které nalezneme v tabulkách: $c_1 = 4180\,\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$, $c_2 = 383\,\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$, a $m_1 = \rho V_1 = 1000 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} = 0{,}25\,\mathrm{kg}$ je hmotnost vody. Po dosazení dostáváme

$$c_2 m_2 (t_2 - t) = c_1 m_1 (t - t_1) + C(t - t_1),$$

odtud po úpravě

$$t = \frac{c_2 m_2 t_2 + (c_1 m_1 + C)\, t_1}{c_2 m_2 + c_1 m_1 + C} = \frac{383 \cdot 0{,}5 \cdot 50 + (4180 \cdot 0{,}25 + 200) \cdot 20}{383 \cdot 0{,}5 + 4180 \cdot 0{,}25 + 200}\,^\circ\mathrm{C} \doteq 24\,^\circ\mathrm{C}.$$

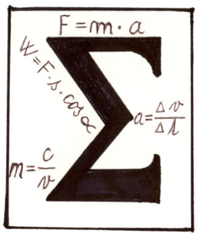
Výsledná teplota bude přibližně $24\,^\circ\mathrm{C}$.

U2.10.-4. V rychlovarné konvici o zanedbatelné tepelné kapacitě je voda o objemu 1 litru a teplotě $t_1 = 20\,^\circ\mathrm{C}$. Po zapnutí je voda uvedena do varu za čas $\tau = 3\,\mathrm{min}$. Jaký je příkon konvice, budeme-li předpokládat její 100 % účinnost?

U2.10.-5. Jaké teplo je třeba dodat $m = 2\,\mathrm{kg}$ vzduchu uzavřenému v pevné nádobě, aby jeho teplota vzrostla o $\Delta t = 25\,^{\circ}\mathrm{C}$?

U2.10.-6. Jaké teplo je třeba dodat $m = 2\,\mathrm{kg}$ vzduchu v nádobě s pohyblivým pístem, aby při izobarické změně jeho teplota vzrostla o $\Delta t = 25\,^{\circ}\mathrm{C}$? O kolik vzroste jeho vnitřní energie a jakou práci plyn vykoná? Nápověda: protože přírůstek vnitřní energie ideálního plynu závisí pouze na přírůstku teploty, je stejný jako v předchozí úloze, kdy plyn nekonal práci.

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly. Vodítkem vám mohou být vytýčené studijní cíle.



Tepelná kapacita vyjadřuje, jaké teplo musíme dodat určitému tělesu, aby se jeho teplota zvýšila o 1 ˚C (o 1 K), charakterizuje určité těleso. Chceme-li zvýšit teplotu tělesa o tepelné kapacitě *C* o Δ*t*, musíme mu dodat teplo $Q = C\Delta t$.

Měrná tepelná kapacita materiálu udává, jaké teplo musíme dodat na 1 kg tělesa z tohoto materiálu, aby se jeho teplota zvýšila o 1 ˚C (o 1 K), charakterizuje určitý materiál. Chceme-li zvýšit teplotu tělesa o hmotnosti *m* tvořeného materiálem o měrné tepelné kapacitě *c* o Δ*t*, musíme mu dodat teplo $Q = mc\Delta t$.

Molární tepelná kapacita udává, jaké teplo musíme dodat 1 molu dané látky, aby se její teplota zvýšila o 1 ˚C (o 1 K), charakterizuje určitý materiál.

U plynných těles teplo potřebné k jejich ohřátí o určitou teplotu silně závisí na konkrétním průběhu děje. Proto definujeme měrnou tepelnou kapacitu izochorickou (při konstantním objemu), kdy plyn nekoná práci a veškeré dodané teplo se využije k nárůstu jeho vnitřní energie, a izobarickou (při konstantním tlaku), kdy plyn koná práci a dodané teplo se tedy využije k nárůstu jeho vnitřní energie jen zčásti.

2.11 Změny skupenství látek

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. pojmenovat přechody mezi jednotlivými skupenstvími a ke každému uvést konkrétní příklad
2. vysvětlit, co je tzv. normální teplota tání a měrné skupenské teplo tání, vyhledat je v tabulkách
3. vysvětlit pojem var a popsat, jak se mění teplota varu v závislosti na tlaku, uvést příklad využití této závislosti
4. definovat měrné skupenské teplo varu a vyhledat je v tabulkách. Vysvětlit, jak se liší od měrného skupenského tepla vypařování
5. definovat měrné skupenské teplo sublimace
6. řešit jednoduché úlohy týkající se změn skupenství

60 minut

Teplota /2.5/, tepelná rovnováha /2.5/ teplo, vnitřní energie/2.7/, vlastnosti a vnitřní struktura látek různých skupenství /2.8/, tepelná kapacita /2.10/.

Zopakujte si část kapitoly 2.8 věnovanou vnitřní struktuře látek různých skupenství a ujistěte se o tom, že máte i ostatní požadované předběžné znalosti. Pak si prostudujte následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů.

V předchozích kapitolách jsme se seznámili s vybranými vlastnostmi látek různých skupenství. Nyní se stručně seznámíme s ději, při kterých dochází ke změně jednoho skupenství látky na jiné.

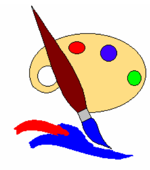
Přechod

- z pevného skupenství na kapalné nazýváme tání, opačný přechod tuhnutí, v případě vzniku krystalické látky také krystalizace
- z kapalného skupenství na plynné nazýváme vypařování, opačný kondenzace (kapalnění),
- z pevného skupenství přímo na plynné nazýváme sublimace, opačný desublimace.

Asi nejběžněji v praxi pozorujeme změny skupenství vody. Při nízkých teplotách je voda pevnou krystalickou látkou – ledem, také sněhové vločky jsou tvořeny ledovými krystalky. Přijetím dostatečného tepla se led ohřeje na teplotu tání. Za normálního tlaku je tato teplota 0 ºC, s rostoucím tlakem teplota tání ledu klesá, například pod nožem brusle bruslaře led taje již při nižší teplotě (hustota většiny látek je ale v pevném skupenství větší než v kapalném, jejich teplota tání s tlakem roste). Od teploty tání již nelze vodu v pevném skupenství dodáním dalšího tepla více ohřát, teplo je využito k narušení krystalové mřížky a led taje – mění se na kapalinu. Naopak při postupném ochlazování při překročení 0 ºC voda zamrzá – krystalizuje, tuhne. Amorfní látky nemají krystalickou strukturu a měknou nebo tuhnou postupně v určitém intervalu teplot, o přesné teplotě tání zde nelze hovořit.

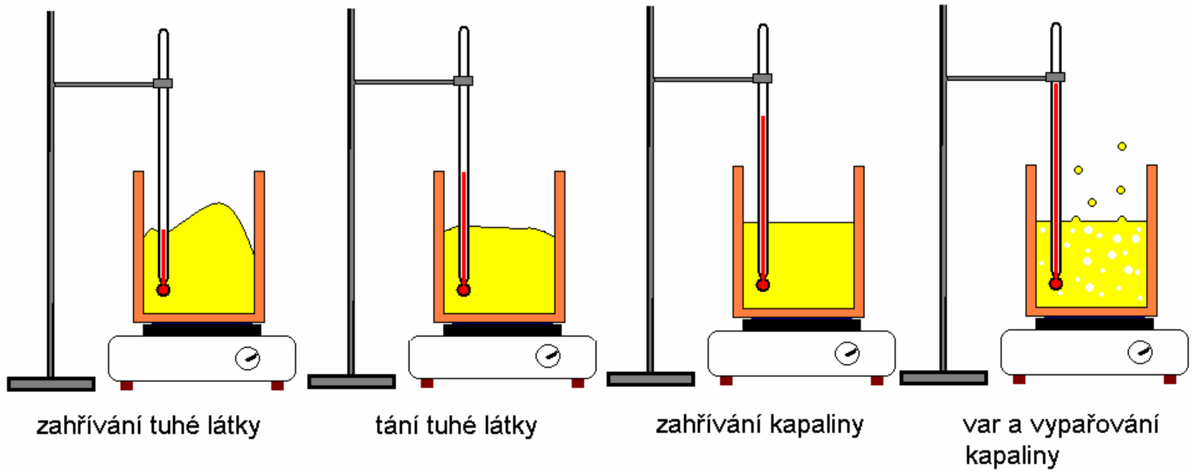
Kapalná voda se při libovolné teplotě vypařuje uvolňováním molekul z jejího povrchu, přičemž vzniká vodní pára. Takto vysychají například kaluže, schne prádlo. Čím vyšší je teplota vody, tím se vypařuje rychleji, při tzv. teplotě varu se bubliny páry vytvářejí i uvnitř kapaliny. Za daného tlaku již nelze teplotu kapalné vody zvýšit dodáním dalšího tepla, to je přednostně využito ke změně jejího skupenství. Za normálního tlaku je teplota varu vody 100 ºC. Teplota varu kapalin roste s rostoucím tlakem, na tomto principu je založen i tlakový hrnec a sterilizační přístroje. Na povrchu vody, jiného tělesa nebo i ve volném prostoru může také docházet k opačnému ději, spojování molekul vodní páry ve vodní kapky – kondenzaci neboli kapalnění. Toho si lze všimnout například po sprchování na zrcadle v koupelně nebo venku při vzniku mlhy.

V přírodě lze pozorovat také přímý přechod vody mezi skupenstvím pevným a plynným. Prostřednictvím sublimace v zimě po několika dnech uschne i zmrzlé prádlo, také sníh za chladných slunečných dnů viditelně ubývá, aniž by tál. Za běžného tlaku sublimuje také např. suchý led (pevný oxid uhličitý), kafr, jod. Příkladem desublimace je vznik jinovatky přímo z vodní páry při teplotách pod 0 °C.



Změna teploty a skupenství látky

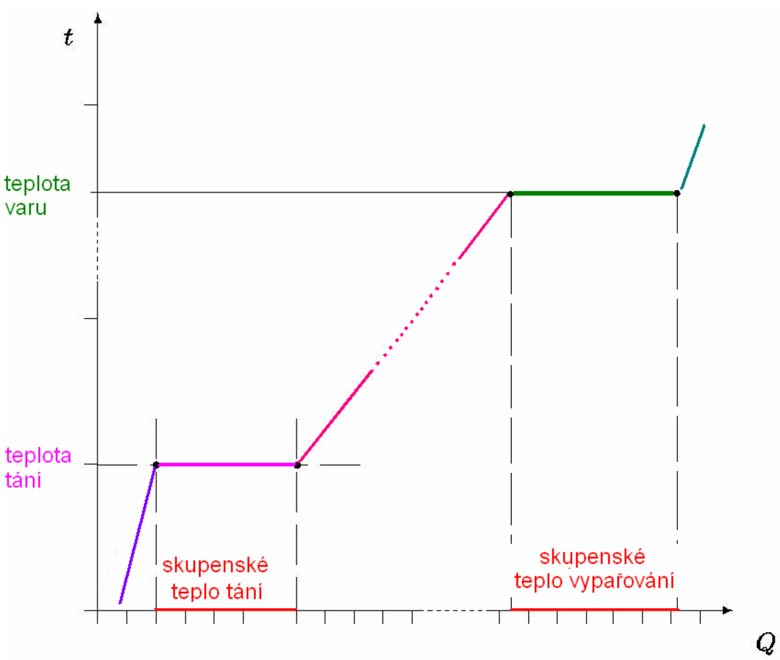
Podívejme se, jak se bude měnit teplota na počátku tuhého tělesa, budeme-li mu rovnoměrně dodávat teplo.



Nejprve pozorujeme přibližně rovnoměrný nárůst teploty s dodávaným teplem. Tuhé těleso se zahřívá. Na určité hodnotě se nárůst teploty pozastaví, i když těleso stále přijímá teplo. Toto teplo je využito na změnu skupenství z pevného na kapalné. Až celé těleso přejde do kapalného skupenství, teplota začne opět narůstat.

Pokud bychom kapalné těleso dále zahřívali, při určité teplotě by začalo vařit. Růst teploty by se opět pozastavil, dokud bychom mu nedodali potřebné skupenské teplo vypařování a celé těleso by nepřešlo do plynného skupenství. Teprve potom by teplota začala zase narůstat.

Nechceme-li příliš zjednodušovat, neměli bychom zapomenout, že ke změně části tělesa z kapalného na plynné skupenství nedochází jen při teplotě varu, ale při nižších teplotách, i když mnohem méně intenzivně, podobně dochází i k přechodu z pevného skupenství přímo na plynné – sublimaci.



Při přechodu mezi jednotlivými skupenstvími těleso přijímá nebo uvolňuje příslušné skupenské teplo L, jeho jednotkou je joule (J). Vyjádříme-li skupenské teplo potřebné pro určitou změnu skupenství 1 kg dané látky, mluvíme o příslušném měrném skupenském teple l, jeho jednotkou je joule na kilogram (Jkg^{-1}). Pro těleso o hmotnosti m je mezi těmito veličinami vztah $L = m \cdot l$. Nyní si definujme měrné skupenské teplo tání, vypařování, varu a sublimace.

Všimněte si, že všechny tyto definice jsou založeny na stejném principu. Měli byste je umět sami vlastními slovy zformulovat, aniž byste se je mechanicky učili zpaměti.

Měrné skupenské teplo tání l_t je teplo vztažené na 1 kg látky, které potřebuje přijmout pevné těleso z dané látky již zahřáté na teplotu tání, aby se změnilo na kapalinu téže teploty.

Teploty tání a měrná skupenská tepla tání běžných kapalin a plynů, případně i pevných látek, lze najít v tabulkách. Měrné skupenské teplo tuhnutí, odpovídající opačnému přechodu, je stejně velké jako měrné skupenské teplo tání.

Měrné skupenské teplo vypařování l_v je teplo vztažené na 1kg látky, spotřebované při jejím přechodu z kapalného skupenství na plynné při zachování teploty.

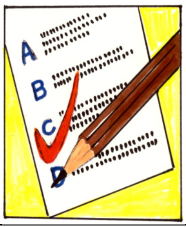
Měrné skupenské teplo vypařování klesá s rostoucí teplotou kapaliny a je stejně velké jako měrné skupenské teplo kondenzační, uvolněné při opačném přechodu.

Měrné skupenské teplo varu je teplo vztažené na 1kg látky, které potřebuje přijmout kapalné těleso z dané látky již zahřáté na teplotu varu, aby se změnilo na plyn téže teploty.

Jedná se vlastně o měrné skupenské teplo vypařování při teplotě varu. Teploty varu a měrná skupenská tepla varu běžných kapalin a plynů lze najít v tabulkách.

Měrné skupenské teplo sublimace l_s je teplo vztažené na 1kg látky, spotřebované při jejím přechodu z pevného skupenství na plynné při zachování teploty.

Měrné skupenské teplo sublimace klesá s rostoucí teplotou a je stejně velké jako měrné skupenské teplo desublimace, uvolněné při opačném přechodu.



KO2.11.-1. Doplňte chybějící údaje v tabulce.

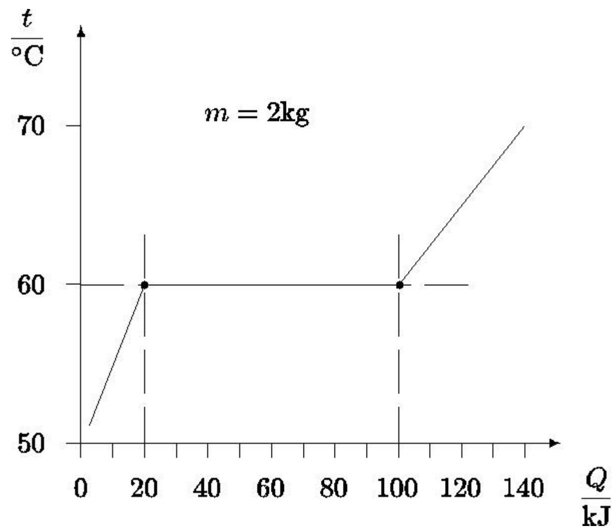
skupenství I	skupenství II	přechod I $\rightarrow$ II	přechod I $\leftarrow$ II
pevné	kapalné		
pevné	plynné		
kapalné	plynné	vypařování, var	

KO2.11.-2. Jednotkou skupenského tepla tání a vypařování je

a) $J\,kg^{-1}$
b) $J\,kg^{-1}\,K^{-1}$
c) $J\,K^{-1}$
d) J

KO2.11.-3. Jednotkou měrného skupenského tepla tání a vypařování je
a) J kg^{-1}
b) J kg^{-1} K^{-1}
c) J K^{-1}
d) J

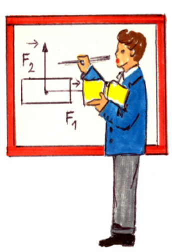
KO2.11.-4. Prostudujte si graf (viz. obr. 2.11-1) znázorňující vývoj teploty tělesa o hmotnosti 2 kg v závislosti na dodaném teple. Těleso při zahřívání mění své skupenství z pevného na kapalné. Z grafu vyčtěte hodnoty následujících veličin:
1) teplota tání t =_______ ºC
2) skupenské teplo tání L_t = _______ J
3) měrné skupenské teplo tání l_t = _______ Jkg^{-1}



obr. 2.11-1

KO2.11.-5. Rozhodněte, která z následujících tvrzení jsou pravdivá.
a) Měrné skupenské teplo vypařování je větší nebo rovno měrnému skupenskému teplu varu.
b) Teplota varu vody na Mount Everestu je vyšší než v Ostravě.
c) Teplota varu vody je vyšší než teplota varu kyslíku.
d) Při vaření vzniká v tlakovém hrnci podtlak vůči atmosférickému tlaku.

KO2.11.-6. Teplota kapalného dusíku stojícího již několik minut v otevřené polystyrenové nádobě na stole v učebně o teplotě 22 ºC bude
a) rovna 22 ºC
b) jen nepatrně nižší než 22 ºC
c) rovna –196 ºC (teplota varu dusíku)



Do vody o teplotě $t_1 = 10\,^{\circ}\mathrm{C}$ a hmotnosti $m = 2\,\mathrm{kg}$ vhodíme kostku ledu o stejné hmotnosti a teplotě $t_2 = -10\,^{\circ}\mathrm{C}$. Jaká bude výsledná teplota systému? Střední hodnota měrné tepelné kapacity ledu v dané oblasti teplot je $c_1 = 2140\ \mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$, vody $c_v = 4200\,\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$ a měrné skupenské teplo tání ledu $l_t = 334\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1}}$.

Řešení:

Teplota vody je větší než teplota ledu, proto bude voda teplo odevzdávat a led přijímat. Teplota tání ledu a tuhnutí vody je $t_{\mathrm{t}} = 0\ {}^{\circ}\mathrm{C}$. Led potřebuje k zahřátí na teplotu tání teplo

$$Q = m \cdot c_1 \cdot (t_{\mathrm{t}} - t_2) = 2 \cdot 2140 \cdot [0 - (-10)]\ \mathrm{J} = 42\ \mathrm{kJ}$$

voda by při ochlazení na tuto teplotu ztratila teplo

$$Q' = m \cdot c_{\mathrm{v}} \cdot (t_1 - t_{\mathrm{t}}) = 2 \cdot 4200 \cdot [10 - 0]\ \mathrm{J} = 84\ \mathrm{kJ}.$$

To je větší než teplo *Q*, proto se led ohřeje na t_{t} a začne tát. Rozpuštění veškerého ledu by vyžadovalo skupenské teplo tání

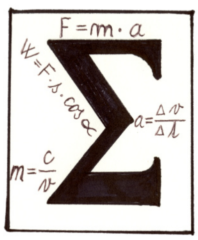
$$L_{\mathrm{t}} = m \cdot l_{\mathrm{t}} = 2 \cdot 334 \cdot 10^3\ \mathrm{J} = 668\ \mathrm{kJ},$$

které je větší než $Q' - Q$, proto roztaje jen jeho část a výsledná teplota bude rovna $t_{\mathrm{t}} = 0\ {}^{\circ}\mathrm{C}$.

U2.11.-7. O kolik poklesne teplota tání ledu pod nožem brusle hokejisty o hmotnosti *m* = 90 kg, jede-li právě po jedné brusli a velikost styčné plochy mezi nožem brusle a ledem je $S = 5 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m}^2$? Nárůstu tlaku o $\Delta p = 0{,}1\ \mathrm{MPa}$ odpovídá pokles teploty tání ledu o $\Delta t = 7{,}5\ \mathrm{mK}$.

U2.11.-8. Kolik tepla je třeba dodat ledovému kvádru o teplotě $t = 0\ {}^{\circ}\mathrm{C}$ a hmotnosti *t* = 3 kg, aby roztál, vzniklá voda začala vařit a vypařila se? Průměrná hodnota měrné tepelné kapacity vody v rozsahu $0 - 100\ {}^{\circ}\mathrm{C}$ je $c = 4190\ \mathrm{J} \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-1}$, ostatní potřebné údaje naleznete v tabulkách.

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly s ohledem na stanovené studijní cíle.



Přechod z pevného skupenství na kapalné nazýváme tání, opačný tuhnutí (v případě vzniku krystalické látky také krystalizace), z kapalného na plynné vypařování, opačný kondenzace (kapalnění), z pevného na plynné sublimace, opačný desublimace.

U krystalických látek za normálního tlaku dochází k tání při teplotě nazývané normální teplota tání. Aby se při této teplotě změnilo skupenství tělesa z pevného na kapalné, je třeba mu na jeden kilogram jeho hmotnosti dodat teplo nazvané měrné skupenské teplo tání.
Při varu dochází k přechodu molekul z kapalného skupenství do plynného nejen z povrchu kapaliny, ale i zevnitř za vzniku bublinek. Var nastává při teplotě varu, která s tlakem roste. 1 kg dané látky potřebuje na změnu skupenství z kapalného na plynné při této teplotě teplo o hodnotě měrného tepla varu.

Měrné skupenské teplo vypařování je teplo vztažené na 1kg látky, spotřebované při jejím přechodu z kapalného skupenství na plynné při zachování teploty (i nižší než teplota varu).

Měrné skupenské teplo sublimace je teplo vztažené na 1kg látky, spotřebované při jejím přechodu z pevného skupenství na plynné při zachování teploty.

2.12 Přenos tepla

Po prostudování této kapitoly byste měli umět:

1. rozlišit mechanismy přenosu tepla vedením, prouděním a zářením a rozhodnout, kdy se uplatňují.
2. definovat součinitel tepelné vodivosti materiálu
3. definovat součinitel přestupu tepla
4. vyjádřit součinitel prostupu tepla stěnou a její tepelný odpor
5. řešit jednoduché úlohy týkající se prostupu tepla ve stacionárních soustavách (včetně dohledání potřebných údajů v tabulkách)
6. aplikovat vztah pro ztrátu energie zářením

90 minut

Vnitřní energie /2.7/, teplo /2.7/, teplota /2.5/, tepelná rovnováha /2.5/, výkon.

Poté, co se ujistíte o tom, že máte požadované předběžné znalosti, prostudujte si následující teorii s důrazem na pochopení barevně vyznačených pojmů a zákonů. Tato závěrečná kapitola druhého modulu se vám může zdát o něco náročnější než ty předchozí. Skutečně svým obsahem mírně přesahuje obvyklou středoškolskou látku. To proto, že jejím účelem je ukázat podrobněji i to, jak se základní fyzikální poznatky uplatňují v běžné technické praxi.

Jak již víte z kapitoly /2.5/, dáme-li do kontaktu dvě tělesa různé teploty, bude se díky přenosu tepla mezi nimi zvyšovat vnitřní energie atomů chladnějšího tělesa a tím i jeho teplota a snižovat vnitřní energie a teplota teplejšího tělesa, až bude teplota stejná v celé soustavě - nastane tepelná rovnováha. Nyní se blíže podíváme na způsoby, jakými k přenosu tepla dochází.

Teplo je přenášeno z teplejšího na chladnější těleso vedením, prouděním nebo zářením.

1. Kondukce neboli vedení tepla je způsob, kterým je přenášeno teplo zejména v pevných látkách (ale i v statických kapalinách a v plynech). Kovové držadlo pánve na sporáku se kondukcí ohřívá od vlastního tělesa pánve. Je-li sporák elektrický, dno pánve se kondukcí ohřívá od varné plotýnky. Atomy a elektrony v teplejší části tělesa se pohybují s větší energií než v chladnější, prostřednictvím jejich srážek se energie tohoto kmitavého nebo chaotického pohybu přenáší tělesem. V dobrých elektrických vodičích je přenos tepla zejména díky pohybu volných elektronů rychlý, v izolantech je přenos tepla pomalejší.

V kapalinách a zejména plynech je přenos tepla vedením ještě výrazně nižší, proto se u nich často více uplatňuje přenos tepla konvekcí - prouděním.

Z tuhých těles nejhůře vedou teplo pórovité látky obsahující v dutinách vzduch, proto se ve stavebnictví používají duté cihly, pěnový polystyren, skelná vata. Nejvýhodnější je velké množství malých dutinek, které zabraňují i přenosu tepla prouděním. Pokud je materiál porézní (cihly, beton, dřevo atd.), závisí jeho izolační schopnost také na jeho vlhkosti. Voda vede teplo mnohem lépe než vzduch či plyny, takže čím je vlhkost materiálu vyšší, tím hůře izoluje.

Schopnost látky vést teplo charakterizuje součinitel tepelné vodivosti λ. Zjišťuje se experimentálně a je roven teplu, které projde za čas 1s jednotkovou plochou desky tloušťky 1m při teplotním rozdílu jejích povrchů 1°C. Jednotkou součinitele tepelné vodivosti je watt na metr na kelvin, značka: $W.m^{-1}.K^{-1}$.

Součinitel tepelné vodivosti λ umožňuje vypočítat množství tepla Q, které projde za čas τ deskou tloušťky d a obsahu povrchu S při daném teplotním rozdílu povrchů desky Δt, podle vztahu:

$$Q = \lambda \cdot \tau \cdot \Delta t \cdot \frac{S}{d}$$

Součinitele tepelné vodivosti pro vybrané látky a stavební materiály lze porovnat v následující tabulce:

Součinitele tepelné vodivosti pro některé látky (při teplotě 20 °C):			
materiál	λ / ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	materiál	λ / ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
stříbro	418	dřevo měkké, tepelný tok kolmo na vlákna	0,18
měď	395		
hliník	229	dřevo měkké, tepelný tok rovnoběžně s vlákny	0,41
železo	73		
železobeton	1,5	skelná nebo minerální vata	0,04
cihla	0,28-1,2	pěnový polystyren	0,044
škvárobeton	0,70	led	2,2
žula	2,9-4,0	voda	1,0
sklo	0,6-1,0	vzduch	0,24

2. Konvekce neboli proudění tepla je způsob šíření tepla v kapalinách a plynech, při němž se přemísťují přímo částice s větší energií. Jde vlastně o přenos tepla i s tělesem (kapalinou, plynem). Protože teplejší části kapalin a plynů mají menší hustotu, samovolně stoupají vzhůru. Tento přenos energie nastává kolem radiátorů vytápějících místnosti, díky němu může fungovat i samotížné ústřední vytápění, které nepotřebuje cirkulační čerpadlo. Uplatňuje se při vaření jídel, kdy zahřátá voda ode dna hrnce díky své nižší hustotě stoupá vzhůru, chladnější klesá dolů a tak se obsah hrnce rovnoměrně prohřívá. Termálních

vzdušných proudů využívají piloti větroňů, rogal a paraglidingových padáků. Konvekce může být i nucená, například ventilátorem v elektrických přímotopech.

Přesný matematický popis konvekce je složitá záležitost, nebudeme se mu zde proto věnovat. Při jednoduchých praktických výpočtech je konvekce zohledněna pomocí tzv. součinitele přestupu tepla, s kterým se seznámíme za chvíli.

3. Radiace neboli záření, sálání je přenos tepla prostřednictvím elektromagnetických vln. Tyto vlny mohou být viditelné (světlo), ale i neviditelné, například infračervené nebo ultrafialové záření. Tento přenos tepla hraje významnou roli v plynech a je jediným mechanizmem přenosu ve vakuu, které neobsahuje částice. Zářením je k nám přenášena energie ze Slunce, v zimě si můžeme užívat sálavého tepla kamen, sáláním ztrácí zvířata i lidé část své energie. Některá zvířata (například hadi) se při lovu orientují právě díky energii, kterou takto vyzařuje jejich potenciální kořist. Podle Stefanova-Boltzmannova zákona všechna tělesa vyzařují, energie vyzářená za časovou jednotku jednotkou jejich plochy je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty T jejich povrchu.

Celkové vyzářené teplo plochou S za čas τ bude

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot \tau \cdot T^4,$$

kde T je termodynamická teplota povrchu tělesa, $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$ je Stefanova-Boltzmannova konstanta a ε je emisivita povrchu tělesa.

Emisivita je materiálová konstanta nabývající hodnoty mezi 0 pro tělesa, která si s okolím vůbec nevyměňují energii formou záření, a 1 pro ideálně vyzařující a také záření absorbující tělesa (tzv. absolutně černé těleso). Lesklé povrchy a speciální vrstvičky, které se používají u některých oken jako ochranná vrstva před pronikáním tepelného slunečního záření do interiéru, mají hodnotu emisivity nízkou, naopak matná tělesa vysokou, blízkou jedné. Vlastnosti blízké absolutně černému tělesu mají také hvězdy. Při výpočtu ztráty tepla zářením je třeba vzít v úvahu, že zářící tělesa obdobným způsobem také pohlcují energii z okolí. Takto přijaté teplo by pak bylo úměrné čtvrté mocnině termodynamické teploty jeho okolí.

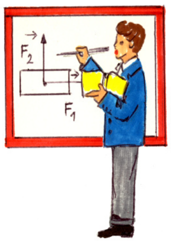
Protože je obvykle obtížné přesně vypočítat přestup tepla mezi stěnou a vzduchem v místnosti, nebo třeba stěnou a tekutinou chladiče, v důsledku všech uvedených mechanizmů tepelného přenosu, zavádí se pro praktické účely veličina nazvaná součinitel přestupu tepla. Hodnota součinitele přestupu tepla α udává obvyklé množství tepla, které projde za daných podmínek 1 m^2 plochy povrchu stěny za 1 sekundu při rozdílu teploty povrchu stěny a okolní tekutiny 1°C. Jednotkou součinitele přestupu tepla je $W.m^{-2}.K^{-1}$.

Teplo, které projde plochou S stěny za čas τ při teplotním rozdílu Δt, je:

$$Q = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot \Delta t.$$

Nyní si uplatnění tepelného přenosu ukážeme na několika praktických příkladech. Protože poslouží zároveň jako základ pro další výklad, kontrolní otázky ponecháme tentokrát až na závěr.

V následující úloze si všimněte rozdílné hodnoty součinitele přestupu tepla pro venkovní a vnitřní stranu zdi. Co je toho příčinou?



Kolik tepla projde za den zdí tloušťky 0,4 m a plochy 20 m^2, jsou-li součinitel tepelné vodivosti λ = 0,7 $W.m^{-1}.K^{-1}$ a součinitele přestupu tepla pro exteriér α_e = 23 $W.m^{-2}.K^{-1}$, pro interiér α_i = 8 $W.m^{-2}.K^{-1}$? Jaká bude teplota venkovní a vnitřní stěny? Teplota vzduchu v místnosti je t_i = 20°C, venkovní teplota t_e = –20°C.

Řešení:

Předpokládejme, že jde o ustálený stav, takže rozložení teplot ve zdi je neměnné.

Označme t'_i teplotu vnitřní stěny, t'_e teplotu vnější stěny. Protože vnitřní energie zdi se v ustáleném stavu nemění, musí být teplo prošlé za dané období zdí a oběma jejími povrchy (stěnami) shodné.

Musí tedy platit: $Q = \alpha_i \cdot \tau \cdot S \cdot (t_i - t'_i)$, $Q = \alpha_e \cdot \tau \cdot S \cdot (t'_e - t_e)$ a $Q = \lambda \cdot \tau \cdot (t'_i - t'_e) \cdot \dfrac{S}{d}$.

Vyřešením soustavy těchto tří rovnic o třech neznámých dostaneme výsledek:

$$Q = \frac{(t_i - t_e)\cdot \tau \cdot S}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda}} = \frac{(20-(-20))\cdot 24 \cdot 3600 \cdot 20}{\frac{1}{8} + \frac{1}{23} + \frac{0{,}4}{0{,}7}}\ \mathrm{J} = 93{,}4\,\mathrm{MJ}\,,$$

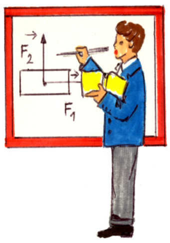
$$t'_i = t_i - \frac{Q}{\alpha_i \cdot \tau \cdot S} = \left(20 - \frac{93{,}4\cdot 10^6}{8\cdot 24\cdot 3600\cdot 20}\right)°\mathrm{C} = 13{,}2\,°\mathrm{C}\,,$$

$$t'_e = t_e + \frac{Q}{\alpha_e \cdot \tau \cdot S} = \left(-20 + \frac{93{,}4\cdot 10^6}{23\cdot 24\cdot 3600\cdot 20}\right)°\mathrm{C} = -17{,}7\,°\mathrm{C}\,.$$

Teplo prošlé zdí z místnosti ven za jeden den Q = 93,4 MJ, teplota stěny v místnosti t'_i = 13,2 °C, vnější teplota zdi t'_e = -17,7 °C.

Ve stavebnictví se často používá charakteristika nazvaná součinitel prostupu tepla U se stejnou jednotkou jako součinitel přestupu tepla ($W.m^{-2}.K^{-1}$). Slouží k vyjádření výsledných tepelně izolačních vlastností celých oken nebo zdí tvořených několika vrstvami různých materiálů (včetně zohlednění jejich případných netěsností). Hodnota součinitele prostupu tepla U se rovná množství tepla, které projde na 1 m^2 plochy za 1 sekundu zevnitř místnosti ven (nebo v létě naopak) při rozdílu vnitřní a venkovní teploty 1°C. Takto se v nabídkách výrobců oken dočteme, že součinitel prostupu tepla u starých zdvojených oken je asi U = 2,9 W/(m² K), u nových oken s izolačním dvojsklem U = 1,4 W/(m² K) a u speciálně upravených izolačních oken i U = 0,8 W/(m² K). Dodavatelé zateplovacích systémů zase informují, že pro nezateplenou omítnutou cihlovou stěnu z plných cihel tloušťky 45 cm je U = 1,5 W/(m² K), stěnu stejné tloušťky z Porothermu U = 0,4 W/(m² K), 20 cm izolace minerální vlnou má U = 0,2 W/(m² K).

Pro výpočet tepelných ztrát budov je užitečné zavést ještě veličinu odpovídající převrácené hodnotě součinitele prostupu tepla U, která se nazývá tepelný odpor a značí R. Počítání s tepelnými odpory je poměrně jednoduché a velmi podobné výpočtu elektrického odporu soustavy rezistorů, jak uvidíme na následujícím příkladu.



Pro zeď z předchozího řešeného příkladu (tloušťky 0,4 m a plochy 20 m^2, součinitel tepelné vodivosti λ = 0,7 $W.m^{-1}.K^{-1}$ a součinitele přestupu tepla pro exteriér α_e = 23 $W.m^{-2}.K^{-1}$, pro interiér α_i = 8 $W.m^{-2}.K^{-1}$) vypočtěte součinitel prostupu tepla a tepelný odpor.

Řešení:

Z definice součinitele prostupu tepla dostaneme

$$U=\frac{Q}{(t_\mathrm{i}-t_\mathrm{e})\cdot\tau\cdot S}=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_\mathrm{i}}+\frac{1}{\alpha_\mathrm{e}}+\frac{d}{\lambda}}=\frac{1}{\frac{1}{8}+\frac{1}{23}+\frac{0{,}4}{0{,}7}}\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}=1{,}35\ \mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$$

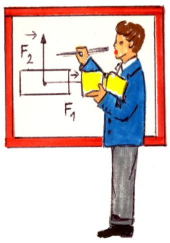
a výsledný tepelný odpor

$$R=\frac{1}{U}=\frac{1}{\alpha_\mathrm{i}}+\frac{1}{\alpha_\mathrm{e}}+\frac{d}{\lambda}=\left(\frac{1}{8}+\frac{1}{23}+\frac{0{,}4}{0{,}7}\right)\mathrm{W^{-1}\cdot m^2\cdot K}=0{,}74\ \mathrm{W^{-1}\cdot m^2\cdot K}\,.$$

Jak je vidět z tohoto vyjádření, tepelné odpory jednotlivých vrstev (odpor průchodu vnitřním a vnějším rozhraním vzduch-zeď a odpor průchodu vlastní zdí) se sčítají:

$$R=\frac{1}{\alpha_\mathrm{i}}+\frac{1}{\alpha_\mathrm{e}}+\frac{d}{\lambda}=R_\mathrm{i}+R_\mathrm{e}+R_\mathrm{z}$$

Podobně je tomu u sendvičových konstrukcí. Podívejme se na následující příklad.



Jaký je tepelný odpor tloušťky 0,4 m s vnitřní izolací z pěnového polystyrenu tloušťky 3 cm, jsou-li součinitel tepelné vodivosti zdi λ = 0,7 $W.m^{-1}.K^{-1}$, izolace λ_p = 0,044 $W.m^{-1}.K^{-1}$, součinitele přestupu tepla pro exteriér α_e = 23 $W.m^{-2}.K^{-1}$, pro interiér α_i = 8 $W.m^{-2}.K^{-1}$? Jaká bude teplota venkovní a vnitřní stěny a rozhraní izolace-zeď? Teplota vzduchu v místnosti je t_i = 20°C, venkovní teplota t_e = –20°C.

Řešení:

Označme t'_i teplotu vnitřní stěny, t'_e teplotu vnější stěny, t'' teplotu rozhraní izolace-zeď. Nejprve vyčíslíme tepelný odpor soustavy.

$$R=R_\mathrm{i}+R_\mathrm{e}+R_\mathrm{z}+R_\mathrm{p}=\frac{1}{\alpha_\mathrm{i}}+\frac{1}{\alpha_\mathrm{e}}+\frac{d}{\lambda}+\frac{d_\mathrm{p}}{\lambda_\mathrm{p}}=\left(\frac{1}{8}+\frac{1}{23}+\frac{0{,}4}{0{,}7}+\frac{0{,}03}{0{,}044}\right)\mathrm{W^{-1}m^2K}=1{,}42\ \mathrm{W^{-1}m^2K}\,.$$

Protože teplo prošlé za jednotku času jednotkou plochy všemi rozhraními a vrstvami musí být v ustáleném stavu stejné, bude

$$\frac{Q}{\tau\cdot S}=\frac{t_\mathrm{i}-t_\mathrm{e}}{R}=\frac{t'_\mathrm{e}-t_\mathrm{e}}{R_\mathrm{e}}=\frac{t_\mathrm{i}-t'_\mathrm{i}}{R_i}=\frac{t'_\mathrm{i}-t''}{R_\mathrm{p}}=\frac{t''-t'_\mathrm{e}}{R_\mathrm{z}}\,.$$

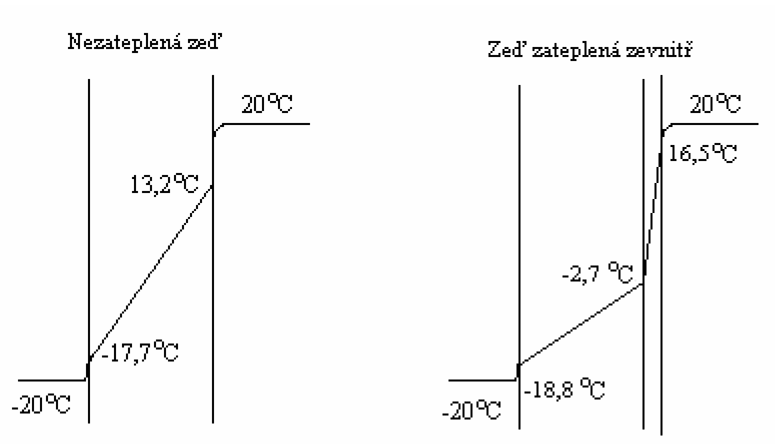
Odtud pak pro jednotlivé teploty dostaneme:

$$t'_\mathrm{e}=t_\mathrm{e}+\frac{R_\mathrm{e}(t_\mathrm{i}-t_\mathrm{e})}{R}=t_\mathrm{e}+\frac{t_\mathrm{i}-t_\mathrm{e}}{\alpha_\mathrm{e}\cdot R}=\left(-20+\frac{20-(-20)}{23\cdot 1{,}42}\right)\mathrm{°C}=-18{,}8\mathrm{°C}$$

$$t_i' = t_i - \frac{R_i(t_i - t_e)}{R} = t_i + \frac{t_i - t_e}{\alpha_i \cdot R} = \left(20 - \frac{20-(-20)}{8 \cdot 1{,}42}\right)°\mathrm{C} = 16{,}5°\mathrm{C}$$

$$t'' = t_e' + \frac{R_z(t_i - t_e)}{R} = t_e' + \frac{d(t_i - t_e)}{\lambda \cdot R} = \left(-18{,}8 + \frac{0{,}4 \cdot (20-(-20))}{0{,}7 \cdot 1{,}42}\right)°\mathrm{C} = \text{-}2{,}7°\mathrm{C}$$

Takovou izolací se tedy sníží tepelné ztráty zdí téměř na polovinu (porovnejte tepelné odpory nezateplené a zateplené konstrukce), zlepší se tepelná pohoda v místnosti díky vyšší vnitřní teplotě stěny, avšak zeď bude v zimě celá promrzat – podívejte se na průběh teplot v nezateplené a zevnitř zateplené zdi na obrázku.



Obr. 2.12-1

Protože vnitřní zateplení má i další nevýhody rizika, doporučuje se tam, kde je to možné, zateplení vnější. Také doporučovaná vrstva izolace musí být větší, má-li vyhovět současným normám.

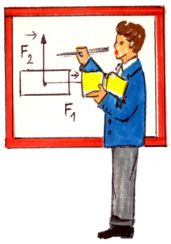
Tepelný odpor, resp. součinitel prostupu tepla předepisuje ČSN 73 0540. Bez splnění této normy by žádná stavba nebo rekonstrukce neměla dostat stavební povolení. Vzhledem k ekologickým i ekonomickým požadavkům na úspory energie se přípustné limity neustále snižují. Dřívější i současné limity jsou uvedeny v následující tabulce.

Požadavky ČSN 73 0540 určující minimální přípustné hodnoty tepelného odporu a maximální hodnoty součinitele prostupu tepla vybraných stavebních konstrukcí

typ konstrukce	od roku	**2005**	2002	1994	1977	1964	
stěna venkovní	*R*	**2,63**	2,63	2,00	0,95	0,70	m² K/W
	U	**0,38**	0,38	0,50	1,05	1,43	W/(m² K)
střecha plochá	*R*	**4,17**	3,33	3,00	1,8	1,30	m² K/W
	U	**0,24**	0,3	0,33	0,56	0,77	W/(m² K)
střecha šikmá	*R*	**4,17**	3,33	2,50			m² K/W
	U	**0,24**	0,3	0,40			W/(m² K)
strop pod neizolovanou půdou	*R*	**4,17**	3,33	3,00	0,86	1,16	m² K/W
	U	**0,24**	0,3	0,33	1,16	0,86	W/(m² K)
podlaha nad nevytáp. prostorem	*R*	**1,67**	1,67	3,00	0,65	1,57	m² K/W
	U	**0,6**	0,6	0,33	1,54	0,64	W/(m² K)

stěna vnitřní k nevytáp. prostorám	R	**1,67**	1,67	1,05	0,56	0,76	m² K/W
	U	**0,6**	0,6	0,95	1,79	1,32	W/(m² K)
okna	U	**1,7**	1,8	2,86	3,7		W/(m² K)

Nyní se podívejme na případ, kdy je plocha zdi tvořena částmi o různých tepelných odporech. Typickým příkladem je venkovní zeď s oknem.



Venkovní stěna (plochy 20 m^2) školní třídy je tvořena z 55% zděnou částí se součinitelem prostupu tepla U = 1,35 W.m^{-2}.K^{-1} a ze 45% okny se součinitelem prostupu tepla U = 2,8 W.m^{-2}.K^{-1}. Teplota vzduchu v místnosti je udržována na t_i = 20°C, venkovní teplota je t_e = –20°C. Určete potřebný výkon topení, jsou-li ostatní tepelné ztráty zanedbatelné. Řešení:

Teplo prošlé za časovou jednotku zdí bude

$$\frac{Q_1}{\tau} = U_1 \cdot (t_i - t_e) \cdot S_1 = 1{,}35 \cdot 40 \cdot 0{,}55 \cdot 20\,\mathrm{W} = 594\,\mathrm{W},$$

teplo prošlé okny bude

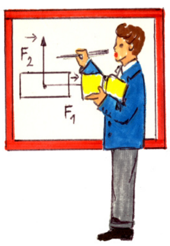
$$\frac{Q_2}{\tau} = U_2 \cdot (t_i - t_e) \cdot S_2 = 2{,}8 \cdot 40 \cdot 0{,}45 \cdot 20\,\mathrm{W} = 1008\ \mathrm{W}.$$

Výkon instalovaného topení tedy musí být nejméně

$$P = P_1 + P_2 = (U_1 \cdot S_1 + U_2 \cdot S_2) \cdot (t_i - t_e) = 1602\,\mathrm{W}.$$

Vidíme, že okny uniká podstatně více tepla než zdí, i když jejich plocha je menší. Při stavbách a rekonstrukcích je třeba dbát na to, aby konstrukce neobsahovaly místa s velmi nízkým tepelným odporem, tzv. tepelné mosty. Takovým tepelným mostem může být třeba kovový překlad nad oknem. Vnitřní teplota zdiva v blízkosti tepelného mostu je pak velmi nízká, dochází zde ke kondenzaci vody a vzniku plísní.

Na závěr se podívejme na možnosti, jak snížit tepelné ztráty zateplením a výměnou starých, dnes již nevyhovujících oken. Následující úlohu už byste měli zvládnout vyřešit sami, řešení použijte jen pro kontrolu.



Venkovní stěna (plochy 20 m^2) školní třídy je tvořena z 55% zdí se součinitelem prostupu tepla U_1 = 1,35 W.m^{-2}.K^{-1} a ze 45% okny se součinitelem prostupu tepla U_2 = 2,8 W.m^{-2}.K^{-1} . Určete, co více sníží spotřebu tepla na vytápění: výměna oken za okna se součinitelem součinitelem prostupu tepla U'_2 = 1,4 W.m^{-2}.K^{-1} , nebo zateplení zděné části 10 cm vrstvou pěnového polystyrenu? Jak poklesne spotřeba tepla po obou úpravách? Potřebné údaje nalezněte v tabulkách. Řešení:

Teplo prošlé celou stěnou za časovou jednotku na 1°C rozdílu vnější a vnitřní teploty bude v původním stavu:

$$P = P_1 + P_2 = U_1 \cdot S_1 + U_2 \cdot S_2 = 40{,}5\,\mathrm{W}$$

po výměně pouze oken:

$$P' = P_1 + P'_2 = U_1 \cdot S_1 + U'_2 \cdot S_2 = 27{,}5\,\mathrm{W}$$

po zateplení pouze zdi:

$R_1' = R_1 + R_p = \dfrac{1}{U_1} + \dfrac{d_p}{\lambda_p} = \dfrac{1}{1{,}35} + \dfrac{0{,}1}{0{,}044} = 3{,}01\,\mathrm{W^{-1}m^2K}$ (součinitel tepelné vodivosti polystyrenu byl nalezen v tabulce), $U_1' = \dfrac{1}{R_1} = 0{,}33\ \mathrm{W\ m^{-2}K^{-1}}$, takže

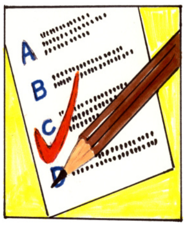
$P'' = P_1' + P_2 = U_1' \cdot S_1 + U_2 \cdot S_2 = 28{,}8\,\mathrm{W}$.

Výměna oken sníží ztráty více než zateplení, ale rozdíl mezi nimi je malý.

Po obou úpravách:

$P''' = P_1' + P_2' = U_1' \cdot S_1 + U_2' \cdot S_2 = 16{,}2\,\mathrm{W}$, tj. úspora 60%.

Ve skutečnosti budou výsledné úspory relativně o něco menší, protože nepoklesnou např. námi nezapočítané ztráty větráním. Při větrání oknem vypouštíme i teplo (ztráta prouděním) a při delším větrání se nezanedbatelně ochlazuje i vnitřní zdivo budovy. Těmto ztrátám musí předcházet projektanti vysoce úsporných, tzv. pasivních domů, kde se proto využívá rekuperace. Rekuperace neboli zpětné získávání tepla je děj, při němž se přiváděný vzduch do budovy předehřívá teplým odpadním vzduchem. Teplý vzduch není tedy bez užitku odveden otevřeným oknem ven, ale v rekuperačním výměníku odevzdá většinu svého tepla přiváděnému vzduchu. Účinnost kvalitních rekuperačních jednotek dosahuje 60-90%.



KO2.12.-1. Jakému mechanismu tepelných ztrát (vedením, prouděním, zářením) zabraňují následující vlastnosti moderního oblečení pro turistiku a sport:

a) nepropustnost vůči větru
b) nepromokavost
c) paropropustnost

KO2.12.-2. Seřaďte uvedené stavební materiály podle tloušťky nutné k zabezpečení stejného tepelného odporu od nejmenší po největší: sklo, železo, dřevo, železobeton, pěnový polystyren.

KO2.12.-3. Jednotkou součinitele tepelné vodivosti je

a) $\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$
b) $\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$
c) $\mathrm{W^{-1}.m^{2}.K^{1}}$
d) $\mathrm{W^{-1}.m.K}$

KO2.12.-4. Jednotkou součinitele přestupu tepla je

a) $\mathrm{W.m^{-2}.K^{-1}}$
b) $\mathrm{W.m^{-1}.K^{-1}}$
c) $\mathrm{W^{-1}.m^{2}.K^{1}}$
d) $\mathrm{W^{-1}.m.K}$

KO2.12.-5. Kolikrát vzroste zářivý výkon vlákna žárovky, vzroste-li její teplota z T =1000 K na T´= 2000 K (záření absorbované žárovkou z okolí zanedbejte)?

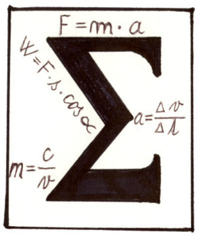
U2.12.-6. Určete teplo, které projde betonovou zdí za 24 hodin. Délka stěny 20 m, výška 2,5 m, tloušťka 0,5 m. Teplota povrchů stěny t_1 = 15 °C, t_2 = -10 °C. Součinitel tepelné vodivosti použitého betonu je λ = 1,1 W/(m.K).

U2.12.-7. Venkovní stěna místnosti je tvořena z jedné třetiny oknem se součinitelem prostupu tepla U_1 = 2,7 W.m^{-2}.K^{-1} a ze dvou třetin zateplenou zdí se součinitelem prostupu tepla U_2 = 0,3 W.m^{-2}.K^{-1} . Porovnejte tepelné ztráty oknem a zdivem.

U2.12.-8. Strop pod neizolovanou nevyužívanou půdou o tepelném odporu R = 1,17 m² K/W je třeba zateplit tak, aby odpovídal současným normám. Jakou vrstvy minerální vaty je třeba použít? Chybějící údaje vyhledejte v tabulkách.

U2.12.-9. Jakou energii ztratil zářením lehce oděný člověk během prvních 10 sekund bezprostředně po vstupu do polária, jehož teplota je –130°C? Průměrná povrchová teplota člověka byla 30°C, efektivní zářivá plocha je 70% z povrchu jeho těla, který je 2 m^2, emisivita lidské kůže 0,98. Absorpci tepla z okolí zanedbejte.

Nyní vlastními slovy shrňte nejdůležitější body této kapitoly s ohledem na studijní cíle.



Základní mechanismy vedení tepla jsou přenos tepla vedením – k předávání tepla dochází prostřednictvím chaotického pohybu částic (zejména u pevných látek, méně se uplatňuje u kapalin a u plynů je prakticky zanedbatelný), prouděním - k předávání tepla dochází díky pohybu tekutiny (kapaliny, plyny) a zářením – ve formě elektromagnetických vln (uplatňuje se i ve vakuu, podstatný je také v plynech.

Součinitel tepelné vodivosti materiálu λ je roven teplu, které projde za čas 1s jednotkovou plochou desky tloušťky 1m při teplotním rozdílu jejích povrchů 1°C. Jednotkou součinitele tepelné vodivosti je watt na metr na kelvin, značka: W.m^{-1}.K^{-1}.

Pro teplo Q, které projde za čas τ deskou tloušťky d a obsahu povrchu S při daném teplotním rozdílu povrchů desky Δt je $Q = \lambda \cdot \tau \cdot \Delta t \cdot \frac{S}{d}$.

Součinitel přestupu tepla α je množství tepla, které projde 1 m^2 plochy povrchu stěny za 1 sekundu při rozdílu teploty povrchu stěny a okolní tekutiny 1°C. Jednotkou součinitele přestupu tepla je W.m^{-2}.K^{-1}.

Teplo, které projde plochou S stěny za čas τ při teplotním rozdílu Δt, je:

$$Q = \alpha \cdot \tau \cdot S \cdot \Delta t\,.$$

Součinitel prostupu tepla U se rovná množství tepla, které projde na 1 m^2 plochy za 1 sekundu zevnitř místnosti ven (nebo v létě naopak) při rozdílu vnitřní a venkovní teploty 1°C. Jeho převrácenou hodnotou je tepelný odpor.

Tepelné odpory jednotlivých vrstev u sendvičových konstrukcí se sčítají.

U stěn složených z částí s různými tepelnými odpory se celkový ztrátový výkon při jednotkovém teplotním rozdílu vypočte jako součet součinitelů prostupu tepla násobených odpovídajícími plochami.

Klíč k modulu 2

2.1 Tekutiny. Tlak

KO2.1-1. c, e

KO2.1-2. d

KO2.1-3. b, d, e

KO2.1-4. $p_{\mathrm{B}} = 14\,\mathrm{Pa}$, $p_{\mathrm{C}} = 10\,\mathrm{Pa}$

U2.1-5. $p = \frac{F}{S} = 66{,}7\,\mathrm{kPa}$

U2.1-6. $\frac{S_2}{S_1} = \frac{m\,g}{F} = 49{,}05$

2.2 Hydrostatický a atmosférický tlak. Vztlaková síla

KO2.2-1. a, d, e

KO2.2-2. c

KO2.2-3. $F_{\mathrm{A}} = F_{\mathrm{B}} < F_{\mathrm{C}} = F_{\mathrm{D}}$

KO2.2-4. $\rho_{\mathrm{A}} > \rho_{\mathrm{K}} > \rho_{\mathrm{C}} = \rho_{\mathrm{D}} > \rho_{\mathrm{B}}$

KO2.2-5. nezmění se (tíha bójky i kapaliny poklesne ve stejném poměru)

KO2.2-6. 1) poklesne
2) poklesne
3) nezmění se
4) poklesne

U2.2-7. $p = h\,\rho\,g = 109\,\mathrm{MPa}$

U2.2-8. Z rovnosti hydrostatických tlaků v úrovni společného rozhraní plyne $\rho_2 = \frac{\rho_1 h_1}{h_2} = 930\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ (při hustotě vody $1000\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$).

U2.2-9. $F_{\mathrm{vz}} = G \Rightarrow \rho_D = \frac{2}{3}\rho_V = 667\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$ (při hustotě vody $1000\ \mathrm{kg\cdot m^{-3}}$).

U2.2-10. Tíha nákladu je rovna maximálnímu možnému nárůstu vztlakové síly, dané hloubkou ponoření pontonu:
$G=\Delta F_{vz}=\rho\Delta h S g \Rightarrow m=\rho\Delta h S=10\ \text{tun}$ (při hustotě vody $1000\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

2.3 Povrchové napětí. Kapilarita

KO2.3-1. b, d, e
KO2.3-2. b, d, e

KO2.3-3. a) $p_3 > p_a = p_2 > p_1$

b) $p_1 > p_2 > p_a$

KO2.3-4. $p_3 > p_2 > p_1 > p_a$

U2.3-5. $\sigma=\dfrac{G}{2l}=\dfrac{mg}{2l}=49\,\text{mN}\,\text{m}^{-1}$

U2.3-6. Bublina má vnější a vnitřní povrch, kapka má pouze jeden povrch; σ je energie na jednotku plochy $\Rightarrow\ \Delta E=\sigma\Delta S=\sigma\pi\left(2D^2-d^2\right)=0{,}40\cdot10^{-3}\,\text{J}$.

U2.3-7. $\sigma=\dfrac{h\rho g d}{4}=39{,}9\,\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$.

2.4 Proudění ideální tekutiny

KO2.4-1. c

KO2.4.-2. b

KO2.4.-3. d

KO2.4.-4. a

KO2.4.-5. energie, příp. hustoty energie

U2.4.-6. $\dfrac{1}{2}\rho v^2=\Delta h \Rightarrow v=\sqrt{2g\Delta h}$

U2.4.-7. $\dfrac{1}{2}\rho v^2=h \Rightarrow v=\sqrt{2gh}$

Využitím Bernoulliovy rovnice za předpokladu, že rychlost poklesu hladiny kapaliny v nádobě je zanedbatelná (otvor je dost malý)

U2.4.-8.

Nejprve vyjádříme objemový tok kapaliny, ten musí být podle rovnice spojitosti v obou místech stejný: $Q_v = S_1 v_1 = S_2 v_2$. Z Bernoulliovy rovnice nebo přímo ze zákona zachování energie navíc pro rychlosti proudění plyne $v_1^2 + 2gh = v_2^2$. Celkově po úpravě $Q_v = S_1 S_2 \sqrt{\dfrac{2hg}{S_1^2 - S_2^2}} = 1{,}0 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^3 s^{-1}} = 0{,}10\ \mathrm{ls^{-1}}$. Doba potřebná k naplnění umyvadla o objemu V bude (dosadíme v litrech) $t = \dfrac{V}{Q_V} = \dfrac{10}{0{,}1}\ \mathrm{s} = 100\mathrm{s}$.

2.5 Teplota a teplotní stupnice

KO2.5.-1. ne (jsou v tepelné rovnováze)
KO2.5.-2. b, f (pouze rozdíl teplot je v obou stupnicích stejný)
U2.5.-3. $\Delta t = 146\ {}^{\circ}\mathrm{C},\ T_1 \doteq 331\,\mathrm{K},\ T_2 \doteq 185\,\mathrm{K},\ \Delta T = 146\,\mathrm{K}$.

2.6 Teplotní roztažnost pevných látek a kapalin

KO2.6.-1. d, c, b, a

KO2.6.-2. a, b, c, d

KO2.6.-3. zinek (má větší teplotní roztažnost, proto se zahřátím více prodlouží a bimetal se ohne směrem ke spínači).

U2.6.-4. Vyjádříme, jak závisí na teplotě objem rtuti a objem hrnce. Při $t_1 = 50\ {}^{\circ}\mathrm{C}$ jsou si oba objemy rovny, odtud pro jejich poměr při $t_2 = 20\ {}^{\circ}\mathrm{C}$ plyne

$$\frac{V_{R2}}{V_{H2}} = \frac{1 + 3\alpha\Delta t}{1 + \beta\Delta t} = 0{,}9974 = 99{,}74\%.$$

U2.6.-5. Hustota kapaliny se bude vyvíjet podle vztahu:

$$\rho_2 = \frac{m}{V_2} = \frac{m}{V_1(1+\beta\Delta t)} = \frac{\rho_1}{(1+\beta\Delta t)} \approx \rho_1(1-\beta\Delta t).$$

Z rovnosti hydrostatických tlaků pak plyne

$$h_2\,\rho_2\,g = h_2\,\rho_1\,(1-\beta\,\Delta t)\,g = h_1\,\rho_1\,g \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{h_2 - h_1}{h_2\,\Delta t} = 0{,}95 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{K}^{-1}.$$

2.7 Termodynamická soustava. Vnitřní energie, práce, teplo

KO2.7.-1.

1) a, c

2) b, d, e

3) b, c

KO2.7.-2. a, b, d, e, f

KO2.7.-3. b,d

U2.7.-4. $\Delta U = W = F\,\Delta s = 10\,\mathrm{J}$. Vzroste jeho teplota.

U2.7.-5. Protože rozměry tlakového hrnce se změní jen zanedbatelně, práce se nekoná a bude $\Delta U = Q_1 - Q_2 = 220\,\mathrm{kJ}$.

2.8 Látka jako soustava částic

KO2.8.-1. d

KO2.8.-2. b, e

KO2.8.-3. 1f, 2d, 3d, 4f, 5f, 6d, 7h, 8h, 9g, 10c, 11a, 12e, 13i, 14h, 15b

U2.8.-4. $M_\mathrm{r} = 2\,A_\mathrm{rH} + A_\mathrm{rO} = 18{,}02$ (viz. tabulky). Z poznámky u řešeného příkladu plyne

$M_\mathrm{m} = 18{,}02\ \mathrm{g\cdot mol^{-1}}$.

U2.8.-5. $n = \dfrac{m}{M_\mathrm{m}} = 55{,}5\,\mathrm{mol}$, $N = n\ N_\mathrm{A} = 3{,}34\cdot 10^{25}$ částic.

U2.8.-6. $\rho = \dfrac{m}{V} = \dfrac{M_\mathrm{m}}{V_\mathrm{mn}} = 1{,}29\,\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$

Pokud byste nenašli molární hmotnost vzduchu v tabulkách, mohli byste ji vypočítat také z jeho složení: $M_\mathrm{m\,vzduchu} = 0{,}78\cdot M_{\mathrm{m\,N_2}} + 0{,}21\cdot M_{\mathrm{mO_2}} + 0{,}01\cdot M_{\mathrm{mA_r}}$.

2.9 Ideální plyn, stavová rovnice

KO2.9.-1. $p\ V = N\ k\ T$

KO2.9.-2. C, a

KO2.9.-3. C, b

KO2.9.-4. B, d

U2.9.-5. $p_2 = \dfrac{p_1 V_1 T_2}{T_1 V_2} = 207\,\mathrm{kPa}$

U2.9.-6. $V \doteq \text{konst.} \Rightarrow p_2 = \dfrac{p_1\ T_2}{T_1} = 501\,\mathrm{kPa}$

U2.9.-7. $m = \dfrac{M_\mathrm{m}\ pV}{RT} = 0{,}24\,\mathrm{kg}$

U2.9.-8. $V = \dfrac{RT}{p} = 22{,}414\ \ \mathrm{l}$

2.10 Tepelná kapacita

KO2.10.-1. b, c

KO2.10.-2. a, e

KO2.10.-3. $C = 900\,\mathrm{J \cdot K^{-1}}$, $c\ = 450\,\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$

U2.10.-4. $P = \dfrac{Q}{\tau} = \dfrac{m c \Delta t}{\tau} = \dfrac{1 \cdot 4200 \cdot 80}{180} = 1870\,\mathrm{W}$ (měrná tepelná kapacita vody) byla nalezena v tabulkách.

U2.10.-5. Jedná se o izochorický děj, pak $Q = c_\mathrm{v}\ m \Delta t = 35{,}7\,\mathrm{kJ}$, izochorická měrná tepelná kapacita vzduchu byla nalezena v tabulkách.

U2.10.-6. $Q = c_\mathrm{p}\ m \Delta t = 50{,}3\,\mathrm{kJ}$, izobarická měrná tepelná kapacita vzduchu byla nalezena v tabulkách. Přírůstek vnitřní energie je roven teplu, které by bylo třeba dodat při izochorickém ději, kdy plyn nekoná práci (viz předchozí úloha): $\Delta U = c_\mathrm{v}\ m \Delta t = 35{,}7\,\mathrm{kJ}$, práce $W = Q - \Delta U = 14{,}6\,\mathrm{kJ}$.

2.11 Změny skupenství látek

KO2.11.-1.

skupenství I	skupenství II	přechod I $\rightarrow$ II	přechod I $\leftarrow$ II

pevné	kapalné	tání	tuhnutí, případně krystalizace
pevné	plynné	sublimace	desublimace
kapalné	plynné	vypařování, var	kapalnění, kondenzace

KO2.11.-2. d

KO2.11.-3. a

KO2.11.-4.

1) teplota tání t = 60 °C

2) skupenské teplo tání L_t = 80 000 J

3) měrné skupenské teplo tání l_t = 40 000 Jkg^{-1}

KO2.11.-5. a, c

KO2.11.-6. c

U2.11.-7. Pod nožem vzroste tlak o $\Delta p' = \frac{mg}{S} = 1{,}77\,\mathrm{MPa}$, čímž teplota tání poklesne o $\Delta t' = \frac{\Delta t\, \Delta p'}{\Delta p} = 0{,}13\,^{\circ}\mathrm{C}(\mathrm{K})$.

U2.11.-8. $Q = L_t + C\,\Delta t + L_v = m\left(l_t + c\,\Delta t + l_v\right) = 9\,\mathrm{MJ}$.

2.12 Přenos tepla

Otázka před první úlohou: rozdílná intenzita proudění vzduchu uvnitř a vně místnosti (vítr atp.)

KO2.12.-1. a) prouděním

b) zejména vedením, vlhkost snižuje tepelný odpor materiálu

c) vedením, neodvětraný pot by opět zvýšil vlhkost materiálu; naopak umožňuje žádoucí ochlazování těla pocením

KO2.12.-2. pěnový polystyren, dřevo, sklo, železobeton, železo

KO2.12.-3. b

KO2.12.-4. a

KO2.12.-5. 16 krát

U2.12.-6. $Q = \frac{(t_1 - t_2) \cdot \tau \cdot S \cdot \lambda}{d} = 238\,\mathrm{MJ}$

U2.12.-7. $Q_\mathrm{o} \propto U_1 \cdot S_1$, $Q_\mathrm{z} \propto U_2 \cdot S_2$. Oknem uniká 4,5 krát více tepla než zdivem.

U2.12.-8. Je třeba doplnit vrstvu s R = 3 m² K/W. Tu má minerální vata při tloušťce $d = \lambda R$ = 12 cm

U2.12.-9. $Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot \tau \cdot T^4 = 6{,}6\ \mathrm{kJ}$, po uvážení absorpce z okolí cca 6,2 kJ.

Literatura k modulu 2

(literatura, z níž bylo čerpáno při tvorbě druhého modulu a lze ji doporučit jako doplněk zájemcům k dalšímu studiu)

1. středoškolské učebnice, přehledy a testy:
   - Lepil O., Bednařík M., Hýblová R.: Fyzika I pro střední školy, Prometheus, Praha, 2001 (kapitoly 7 až 10)
   - Svoboda E. a kol.: Přehled středoškolské fyziky, Prometheus, Praha, 1998 (kapitoly 2.6 a 3.1 až 3.6)
   - Kubínek R., Kolářová H.: Fyzika v příkladech a testových otázkách pro uchazeče o studium na VŠ, Rubico, Olomouc, 1998 (část Mechanika kapalin a plynů a část Molekulová fyzika a termodynamika)
   - Salach S., Plazak T., Sanok Z.: 500 testových úloh z fyziky, český překlad od Kolářové R. vydalo SPN Praha 1993
   - Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy, Prometheus

2. vysokoškolské učebnice a příručky:
   - Halliday D., Resnick R., Walker J.: Fyzika, část 2 – Mechanika – Termodynamika, Vutium, Brno a Prometheus, Praha, 2000 (kapitoly 15, 19 a 20)
   - Horák Z., Krupka F.: Fyzika, SNTL, Praha a Alfa, Bratislava 1981
   - Trojková J.: Základy fyziky. Modul 2 – Mechanika tekutin a termika (pracovní sešit pro distanční kurz), VŠB TU Ostrava, 2001
   - Fojtek A., Foukal J.: Tabulky vybraných fyzikálních a technických veličin, VŠB TU Ostrava, 1992

Tabulky k modulu 2:

1. Základní fyzikální konstanty
2. Hustoty různých látek
3. Abecední seznam prvků
4. Tepelné vlastnosti pevných látek
5. Parametry kapalin
6. Fyzikální parametry plynů
7. Složení vzduchu ve spodních vrstvách
8. Součinitele tepelné vodivosti pro některé látky
9. Požadavky ČSN 73 0540 určující minimální přípustné hodnoty tepelného odporu stavebních konstrukcí

1. Základní fyzikální konstanty

Název konstanty	Symbol	Hodnota konstanty
gravitační konstanta	κ, G	$6{,}672.10^{-11}\ N.m^2.kg^{-2}$
rychlost světla	c	$2{,}997\ 924\ 58.10^{8}\ m.s^{-1}$
permeabilita vakua	μ_0	$4\ \pi.10^{-7}\ H.m^{-1}$
permitivita vakua	ε_0	$8{,}854\ 187\ 82.10^{-12}\ F.m^{-1}$
klidová hmotnost protonu	m_p	$1{,}672\ 648\ 5.10^{-27}\ kg$
klidová hmotnost neutronu	m_n	$1{,}674\ 954\ 3.10^{-27}\ kg$
klidová hmotnost elektronu	m_e	$9{,}109\ 534.10^{-31}\ kg$
elementární elektrický náboj	e	$1{,}602\ 189\ 2.10^{-19}\ C$
Planckova konstanta	h $n = \frac{h}{2\ \pi}$	$6{,}626\ 176.10^{-34}\ J.s$ $1{,}054\ 588\ 7.10^{-34}\ J.s$
Wienova konstanta	b	$2{,}897\ 790.10^{-3}\ m.K$
Stefan - Boltzmannova konstanta	σ	$5{,}670\ 32.10^{-8}\ W.m^{-2}.K^{-4}$
Rydbergova konstanta	$R_\infty = \frac{\mu_0^2\ m_e\ e^4\ c^3}{8\ h^3}$	$1{,}097\ 373\ 177.10^{7}\ m^{-1}$
Bohrův poloměr	a_0	$5{,}291\ 770\ 6.10^{-11}\ m$
Avogadrova konstanta	N_A	$6{,}022\ 045.10^{-23}\ mol^{-1}$
atomová hmotnostní konstanta **(atomová hmotnostní jednotka)**	$u\ (m_u)$	$1{,}660\ 565\ 5.10^{-27}\ kg$
molární plynová konstanta	R	$8{,}314\ 41\ J.mol^{-1}.K^{-1}$
Boltzmannova konstanta	$k = \frac{R}{N_A}$	$1{,}380\ 662.10^{-23}\ J.K^{-1}$
normální molární objem ideálního plynu	V_m	$2{,}241\ 383.10^{-2}\ m^3.mol^{-1}$
Faradayova konstanta	$F = N_A\ e$	$9{,}648\ 455.10^{4}\ C.mol^{-1}$
normální tíhové zrychlení	g_n	$9{,}806\ 65\ m.s^{-2}$
konvenční zraková vzdálenost	l	$0{,}25\ m$

2. Hustoty různých látek

ρ_{20} - hustota při 20 ˚C (u plynných sloučenin při 0 ˚C) za normálního tlaku

Látka		ρ_{20} kg m^{-3}	Látka		ρ_{20} kg m^{-3}
prvky					
hliník		**2 699**	rtuť		**13 546**
chrom		**7 190**	stříbro		**10 503**
jod		**4 930**	titan		**4 510**
kobalt		**8 920**	**uhlík**	**(diamant)**	3 511
křemík		**2 328**		**(grafit)**	2 240
mangan		**7 440**		**(amorfní)**	≈ 1 500
měď		**8 960**	uran		**19 050**
molybden		**10 200**	vápník		**1 550**
nikl		**8 900**	**wolfram**		**19 300**
niob		**8 570**	**zinek**		**7 140**
olovo		**11 341**	**zlato**		**19 320**
platina		**21 450**	**železo**		**7 874**
anorganické sloučeniny					
chlorid sodný ***NaCl***		**2 163**	**peroxid vodíku** H_2O_2		**1 469**
kyselina	dusičná HNO_3	1 530	**voda**	H_2O	**998,2**
	sírová H_2SO_4	1 834		**(led)** H_2O	**916,8**
				(těžká) D_2O	**1 105**

Látka		ρ_{20} **kg m^{-3}**	**Látka**		ρ_{20} **kg m^{-3}**
organické sloučeniny					
glycerin $C_3H_8O_3$		1 260,4	**naftalen** $C_{10}H_8$		**1 140**
kafr $C_{10}H_{16}O$		992	**terpentýn** $C_{10}H_{16}$		**861**
slitiny					
bronz	**(červená litina)**	**8 800**	ocel	chromniklová	7 800 až 8 100
	fosforový	8 700		chromová	7 700 až 7 800
	hliníkový	7 600		**plávková**	7 850
	zrcadlový	8 400		**uhlíková**	**7 800**
	zvonový	8 850		**wolframová**	**7 500 až 8 300**
dural		**2 750 až 2 870**	**pájka**	**měkká**	**7 500 až 8 500**
litina šedá		**7 200**		olověná	9 400
mosaz		**8 300 až 8 600**			
stavební hmoty					
azbest		**1 500 až 2 000**	**asfalt**		**1 400**
dřevo					
bambusové		**400**	**ebenové**		**1 200**
borové		500	**jedlové**		**650**
bukové		750	**korkové**		**250**
dubové		700	**smrkové**		**650**
sklo, izolanty					
diamant		3 500	**sklo**	**křemenné**	**2 200**
ebonit		1 100 až 1 200		**Pyrex**	**2 250**
jantar		1 000 až 1 100			

<table>
<tr><th colspan="2">Látka</th><th>ρ_{20}
kg m^{-3}</th><th colspan="2">Látka</th><th>ρ_{20}
kg m^{-3}</th></tr>
<tr><td colspan="6">paliva</td></tr>
<tr><td colspan="2">antracit</td><td>1 300 až 1 500</td><td colspan="2">nafta</td><td>730 až 940</td></tr>
<tr><td colspan="2">benzin</td><td>690 až 770</td><td colspan="2">olej topný</td><td>900 až 960</td></tr>
<tr><td colspan="2">koks</td><td>1 600 až 1900</td><td colspan="2">petrolej</td><td>810 až 840</td></tr>
<tr><td colspan="6">plastické hmoty</td></tr>
<tr><td colspan="2">kaučuk</td><td>920 až 1 230</td><td colspan="2">polystyren</td><td>1 054 až 1 070</td></tr>
<tr><td colspan="2">plexisklo</td><td>1 160 až 1 200</td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">vosky a tuky</td></tr>
<tr><td colspan="2">lůj</td><td>900 až 970</td><td rowspan="2">olej</td><td>ricinový</td><td>950</td></tr>
<tr><td colspan="2">máslo</td><td>870 až 950</td><td>řepkový</td><td>920</td></tr>
<tr><td colspan="2">mléko (kravské)</td><td>1 030 až 1 040</td><td rowspan="3">vosk</td><td>laboratorní</td><td>980</td></tr>
<tr><td rowspan="2">olej</td><td>lněný</td><td>940</td><td>pečetní</td><td>1 800</td></tr>
<tr><td>olivový</td><td>910</td><td>včelí</td><td>950</td></tr>
</table>

3. Abecední seznam prvků

Prvek	Značka	Z	A_r	Prvek	Značka	Z	A_r
aktinium	**Ac**	**89**	**(227)**	**fosfor**	**P**	**15**	**30,973 76**
americium	**Am**	**95**	**(243)**	**francium**	**Fr**	**87**	**(223)**
antimon	**Sb**	**51**	**121,75**	**gadolinium**	**Gd**	**64**	**157,25**
argon	**Ar**	**18**	**39,948**	**gallium**	**Ga**	**31**	**69,72**
arsen	**As**	**33**	**74,921 6**	**germanium**	**Ge**	**32**	**72,59**
astat	**At**	**85**	**(210)**	**hafnium**	**Hf**	**72**	**178,49**
baryum	**Ba**	**56**	**137,33**	**helium**	**He**	**2**	**4,002 60**
berkelium	**Bk**	**97**	**(247)**	**hliník**	**Al**	**13**	**26,981 54**
beryllium	**Be**	**4**	**9,012 18**	**holmium**	**Ho**	**67**	**164,930 4**
bismut	**Bi**	**83**	**208,980 4**	**hořčík**	**Mg**	**12**	**24,305**
bor	**B**	**5**	**10,81**	**chlor**	**Cl**	**17**	**35,453**
brom	**Br**	**35**	**79,904**	**chrom**	**Cr**	**24**	**51,996**
cer	**Ce**	**58**	**140,12**	**indium**	**In**	**49**	**114,82**
cesium	**Cs**	**55**	**132,905 4**	**iridium**	**Ir**	**77**	**192,22**
cín	**Sn**	**50**	**118,69**	**jod**	**I**	**53**	**126,904 5**
curium	**Cm**	**96**	**(247)**	**kadmium**	**Cd**	**48**	**112,41**
draslík	**K**	**19**	**39,098 3**	**kaliformium**	**Cf**	**98**	**(251)**
dusík	**N**	**7**	**14,006 7**	**kobalt**	**Co**	**27**	**58,933 2**
dysprosium	**Dy**	**66**	**162,50**	**krypton**	**Kr**	**36**	**82,80**
einsteinium	**Es**	**99**	**(254)**	**křemík**	**Si**	**14**	**28,085 5**
erbium	**Er**	**68**	**167,26**	**kyslík**	**O**	**8**	**15,999 4**
europium	**Eu**	**63**	**151,96**	**lanthan**	**La**	**57**	**138,905 5**
fermium	**Fm**	**100**	**(257)**	**lawrencium**	**Lr**	**103**	**(260)**
fluor	**F**	**9**	**18,998 403**	**lithium**	**Li**	**3**	**6,941**

Prvek	Značka	Z	A_r	Prvek	Značka	Z	A_r
lutecium	**Lu**	**71**	**174,97**	**rhodium**	**Rh**	**45**	**102,905 5**
mangan	**Mn**	**25**	**54,938 0**	**rtuť**	**Hg**	**80**	**200,59**
měď	**Cu**	**29**	**63,546**	**rubidium**	**Rb**	**37**	**85,467 8**
mendělevium	**Md**	**101**	**(258)**	**ruthenium**	**Ru**	**44**	**101,07**
molybden	**Mo**	**42**	**95,94**	**rutherfordium (kurčatovium)**	**Rf (Ku)**	**104**	**(260)**
neodym	**Nd**	**60**	**144,24**	**samarium**	**Sm**	**62**	**150,4**
neon	**Ne**	**10**	**20,179**	**selen**	**Se**	**34**	**78,96**
neptunium	**Np**	**93**	**237,048 2**	**síra**	**S**	**16**	**32,06**
nielsbohrium **(hahnium)**	**Ns (Hn)**	**105**	**(261)**	**skandium**	**Sc**	**21**	**44,955 9**
nikl	**Ni**	**28**	**58,70**	**sodík**	**Na**	**11**	**22,989 77**
niob	**Nb**	**41**	**92,906 4**	**stroncium**	**Sr**	**38**	**87,62**
nobelium	**No**	**102**	**(259)**	**stříbro**	**Ag**	**47**	**107,868**
olovo	**Pb**	**82**	**207,2**	**tantal**	**Ta**	**73**	**180,947 9**
osmium	**Os**	**76**	**190,2**	**technecium**	**Tc**	**43**	**(97)**
palladium	**Pd**	**46**	**106,4**	**tellur**	**Te**	**52**	**127,60**
platina	**Pt**	**78**	**195,09**	**terbium**	**Tb**	**65**	**158,925 4**
plutonium	**Pu**	**94**	**(244)**	**thallium**	**Tl**	**81**	**204,37**
polonium	**Po**	**84**	**(209)**	**thorium**	**Th**	**90**	**232,038 1**
praseodym	**Pr**	**59**	**140,907 7**	**thulium**	**Tm**	**69**	**168,934 2**
promethium	**Pm**	**61**	**(145)**	**titan**	**Ti**	**22**	**47,90**
protaktinium	**Pa**	**91**	**231,035 9**	**uhlík**	**C**	**6**	**12,011**
radium	**Ra**	**88**	**226,025 4**	**uran**	**U**	**92**	**238,029**
radon	**Rn**	**86**	**(222)**	**vanad**	**V**	**23**	**50,941 4**
rhenium	**Re**	**75**	**186,207**	**vápník**	**Ca**	**20**	**40,08**

Prvek	Značka	Z	A_r	Prvek	Značka	Z	A_r
vodík	**H**	**1**	**1,007 9**	zinek	**Zn**	**30**	**65,38**
wolfram	**W**	**74**	**183,85**	zirkonium	**Zr**	**40**	**91,22**
xenon	**Xe**	**54**	**131,30**	zlato	**Au**	**79**	**196,966 5**
ytterbium	**Yb**	**70**	**173,04**	železo	**Fe**	**26**	**55,847**
yttrium	**Y**	**39**	**88,905 9**				

4. Tepelné vlastnosti pevných látek

α teplotní součinitel délkové roztažnosti mezi 0 °C a 100 °C
c_p měrná tepelná kapacita při stálém tlaku při 20 °C

Látka	α (10^{-6} K^{-1})	c_p (J kg^{-1} K^{-1})	Látka		α (10^{-6} K^{-1})	c_p (J kg^{-1} K^{-1})
hliník	**23,8**	896	**stříbro**		**19,7**	**235**
jod	**83**	226	**titan**		**9**	**520**
kobalt	**13**	422	**uhlík**	**diamant**		**460**
křemík	**7,6**	703		**grafit**	**7,9**	**837**
mangan	**23**	476	**wolfram**		**4,3**	**134**
měď	**16,8**	383	**zinek**		**26,3**	**385**
molybden	5	**251**	**zlato**		**14,3**	**129**
nikl	12,8	**448**	**železo**		**12**	**450**
olovo	**31,3**	129	**led** (H_2O) (pod 0 °C)		**51**	**2 090**
platina	**9,0**	133	**naftalen**		**94**	**1 290**

5. Parametry kapalin

ρ_{20} hustota při 20 ˚C; σ_{20} povrchové napětí při 20 ˚C; c_{20} měrná tepelná kapacita při 20 ˚C; β_{20} součinitel objemové roztažnosti při 20 ˚C; t_t teplota tání; l_t měrné skupenské teplo tání; t_s teplota varu; l_s měrné skupenské teplo varu

Kapalina		ρ_{20} kg m^{-3}	σ_{20} 10^{-3} Nm^{-1}	c_{20} kJ kg^{-1} K^{-1}	β_{20} 10^{-3} K^{-1}	t_t ˚C	l_t kJ kg^{-1}	t_s ˚C	l_s kJ kg^{-1}
aceton C_3H_6O		790	23,3	2,16	1,43	- 95,4	96	56,2	523
anilin C_6H_7N		1 022	40,5	2,06	0,85	- 6,0	113	184,4	448
glycerin $C_3H_8O_3$		1 261	62,5	2,43	0,50	18,6	200	290	
kyselina	dusičná HNO_3	1 527		1,72	1,24	- 41,6	40	83	481
	sírová H_2SO_4	1 840		1,38	0,57	10,4	109		
methanol CH_4O		791	22,7	2,47	1,19	- 93,9	100	64,7	1 101
olej	ricinový	960	36,4	1,93	0,69				
	terpentýnový	855	27	1,80	0,97	- 10		160	293
petrolej		760	27	2,14	0,96				
rtuť Hg		13 546	491	0,14	0,18	- 38,8	11,7	356,6	301
voda H_2O		998	73,0	4,18	0,18	0,0	332,4	99,6	2 257

6. Fyzikální parametry plynů

M molární hmotnost; ρ hustota; c_p, c_V měrné tepelné kapacity za stálého tlaku a objemu; t_t teplota tání; l_t měrné skupenské teplo tání; t_s teplota varu; l_s měrné skupenské teplo varu

Plyn		M	ρ	c_p	c_V	t_t	l_t	t_s	l_s
			za normálních podmínek a normálního tlaku						
		kg kmol^{-1}	kg m^{-3}	kJ kg^{-1} K^{-1}		°C	kJ kg^{-1}	°C	kJ kg^{-1}
acetylén	C_2H_2	26,036	1,171	1,629	1,323	- 81,8	96,3	- 83,6	829
argon	**Ar**	39,944	1,784	0,532	0,316	- 189,3	29,4	- 185,9	163
benzol	C_6H_6	78,108	3,550	1,252	1,137	+ 5,45	127,0	+ 80,0	396
čpavek	NH_3	17,032	0,771	2,056	1,555	- 77,7	339,1	- 33,4	1 372
dusík	N_2	28,016	1,250	1,038	0,739	- 210,0	25,7	- 195,8	199
ethan	C_2H_6	30,068	1,356	1,645	1,348	- 183,2	92,9	- 89,0	490
ethylén	C_2H_4	28,052	1,260	1,474	1,181	- 169,2	104,7	- 103,7	525
hélium	**He**	4,003	0,178	5,234	3,152	- 271,0	3,5	- 268,9	21

Plyn			M	ρ	c_p	c_V	t_t	l_t	t_s	l_s
				za normálních podmínek a normálního tlaku						
			kg mol^{-1}	kg m^{-3}	kJ kg^{-1} K^{-1}		˚C	kJ kg^{-1}	˚C	kJ kg^{-1}
chlór		Cl_2	70,914	3,214	0,502	0,375	- 103,0	188,4	- 354,1	260
chlorovodík		**HCl**	36,465	1,639	0,812	0,573	- 115,5	56,1	- 85,0	444
oxid	uhelnatý	**CO**	28,010	1,250	1,043	0,743	- 205,1	30,1	- 191,5	216
	uhličitý	CO_2	44,010	1,977	0,821	0,628	- 56,6	184,2	- 78,4	574
	siřičitý	SO_2	64,060	2,927	0,632	0,498	- 75,7	116,8	- 10,0	402
kyslík		O_2	32,000	1,429	0,917	0,657	- 218,8	13,8	- 183,0	214
methan		CH_4	16,042	0,717	2,173	1,675	- 182,6	58,6	- 161,4	510
propan		C_3H_8	44,094	2,019	1,507	1,310	- 187,1	80,0	- 42,2	426
sirovodík		H_2S	34,080	1,538	1,105	0,850	- 85,5	69,5	- 60,5	548
vodík		H_2	2,016	0,090	14,235	10,111	- 259,2	58,2	- 252,8	460
vodní pára		H_2O	18,016	(0,804)	1,855	1,390	(0,0)	(332,4)	(+ 100,0)	(2 257)
vzduch		N_2+O_2	28,966	1,293	1,005	0,714	- 213,0	-	- 192,2	197

7. Složení vzduchu ve spodních vrstvách atmosféry

M **molární hmotnost**
ω_i **objemový podíl**

Plyn	**Chemický vzorec**	M (kg kmol^{-1})	ω_i (%)
dusík	N_2	28,016	**78,09**
kyslík	O_2	32,000	**20,95**
argon	Ar	39,944	**0,93**
oxid uhličitý	CO_2	44,010	**0,03**
neon	Ne	20,183	**0,001 8**
hélium	He	4,003	**0,000 05**
krypton	$\boldsymbol{Kr}$	**83,80**	**0,000 1**
xenon	$\boldsymbol{Xe}$	**131,3**	**0,000 05**
vodík	H_2	2,016	**0,000 008**
ozón	O_3	48,000	**0,000 001**

8. Součinitele tepelné vodivosti pro některé látky

Součinitele tepelné vodivosti pro některé látky (při teplotě 20 °C):			
materiál	λ / (W.m^{-1}.K^{-1})	materiál	λ / (W.m^{-1}.K^{-1})
stříbro	418	dřevo měkké, tepelný tok kolmo na vlákna	0,18
měď	395		
hliník	229	dřevo měkké, tepelný tok rovnoběžně s vlákny	0,41
železo	73		
železobeton	1,5	skelná nebo minerální vata	0,04
cihla	0,28-1,2	pěnový polystyren	0,044
škvárobeton	0,70	led	2,2
žula	2,9-4,0	voda	1,0
sklo	0,6-1,0	vzduch	0,24

9. Požadavky ČSN 73 0540 určující minimální přípustné hodnoty tepelného odporu stavebních konstrukcí

Požadavky ČSN 73 0540 určující minimální přípustné hodnoty tepelného odporu a maximální hodnoty součinitele prostupu tepla vybraných stavebních konstrukcí							
typ konstrukce	od roku	**2005**	2002	1994	1977	1964	
stěna venkovní	*R*	**2,63**	2,63	2,00	0,95	0,70	m² K/W
	U	**0,38**	0,38	0,50	1,05	1,43	W/(m² K)
střecha plochá	*R*	**4,17**	3,33	3,00	1,8	1,30	m² K/W
	U	**0,24**	0,3	0,33	0,56	0,77	W/(m² K)
střecha šikmá	*R*	**4,17**	3,33	2,50			m² K/W
	U	**0,24**	0,3	0,40			W/(m² K)
strop pod neizolovanou půdou	*R*	**4,17**	3,33	3,00	0,86	1,16	m² K/W
	U	**0,24**	0,3	0,33	1,16	0,86	W/(m² K)
podlaha nad nevytáp. prostorem	*R*	**1,67**	1,67	3,00	0,65	1,57	m² K/W
	U	**0,6**	0,6	0,33	1,54	0,64	W/(m² K)
stěna vnitřní k nevytáp. prostorám	*R*	**1,67**	1,67	1,05	0,56	0,76	m² K/W
	U	**0,6**	0,6	0,95	1,79	1,32	W/(m² K)
okna	*U*	**1,7**	1,8	2,86	3,7		W/(m² K)