

IVAN VITÁZEK, ZDENKO TKÁČ

TEPLOTECHNIKA A HYDROTECHNIKA



NITRA 2020

Názov: Teplotechnika a hydrotechnika

Autori: doc. Ing. Ivan Vitázek, CSc. (8,02 AH)
prof. Ing. Zdenko Tkáč, PhD. (1,06 AH)

Recenzenti: prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.
prof. Ing. Anton Žikla, CSc.

Učebnica vznikla v rámci projektu KEGA č. 029SPU-4/2019 "Modernizácia laboratória tepelnej techniky a tvorba metodík experimentov".

© Ivan Vitázek, Zdenko Tkáč

Schválila rektorka Slovenskej poľnohospodárskej univerzity v Nitre dňa 16. 3. 2020
ako vysokoškolskú učebnicu pre študentov SPU v Nitre.

ISBN 978-80-552-2160-1

OBSAH

POUŽITÉ OZNAČENIA	7
PREDHovor	11
1 ZÁKLADNÉ POJMY	12
1.1 TERMODYNAMICKÁ SÚSTAVA	12
1.2 TERMODYNAMICKÁ ROVNOVÁHA	12
1.3 ENERGIA TERMODYNAMICKEJ SÚSTAVY.....	12
1.4 PRÁCA	13
1.5 TEPLo	13
1.6 TEPLoTA	14
1.7 TEKUTINA	14
1.8 TLAK	14
1.9 MNOŽSTVO LÁTKY	15
2 APLIKOVANÁ TERMODYNAMIKA	17
2.1 TEPLoTNÉ VLASTNOSTI LÁTOK	17
2.1.1 Dĺžková teplotná rozťažnosť	17
2.1.2 Objemová teplotná rozťažnosť	17
2.1.3 Zmena tlaku v závislosti od teploty	18
2.1.4 Zmena objemu v závislosti od tlaku	18
2.1.5 Praktický význam rozťažnosti látok	18
2.1.6 Fázový diagram	19
2.2 IDEÁLNE PLYNY	20
2.2.1 Stavová rovnica ideálneho plynu	20
2.2.2 Termodynamické stavové veličiny	21
2.2.3 Prvý zákon termodynamiky	21
2.2.4 Tepelná kapacita látok	22
2.2.5 Absolútna a technická práca plynu	24
2.2.6 Základné vratné zmeny stavu ideálnych plynov	26
2.3 REÁLNE PLYNY	34
2.3.1 Charakteristika ideálnych plynov	34
2.3.2 Charakteristika reálnych plynov	35
2.4 ZÁKLADY TEPELNÝCH OBEHOV	37
2.4.1 Tepelný obeh v p - v a T - s diagrame	37
2.4.2 Carnotov ideálny obeh	38
2.4.3 Druhý zákon termodynamiky	39
2.4.4 Entropický T - s diagram	41
2.4.5 Exergia a anergia	41
2.5 TERMODYNAMIKA PÁR	43
2.5.1 Skupenské výparné teplo	44
2.5.2 Tvorba pary v T - s diagrame	44
2.5.3 Stavové veličiny pár	45

2.5.4 Stavová rovnica vodnej pary	47
2.5.5 Tepelné diagramy pár	47
2.5.6 Vratné zmeny stavu pár	48
2.5.7 Nevratné zmeny stavu pár	50
2.6 MECHANIKA VĽHKÉHO VZDUCHU	52
2.6.1 Vlastnosti vlhkého vzduchu	52
2.6.2 Tabuľky a diagram vlhkého vzduchu	55
2.6.3 Izobarické zmeny stavu vlhkého vzduchu	56
3 TERMOKINETIKA	59
3.1 ROZDELENIE SPÔSOBOV PRENOSU ENERGIE	59
3.1.1 Tepelný a hmotnostný tok	59
3.2 PRENOS ENERGIE ŽIARENÍM	59
3.2.1 Bilancia žiarivého toku energie	60
3.2.2 Vlastnosti materiálov pri prenose energie žiarením	61
3.2.3 Základné zákony pri prenose energie žiarením	61
3.2.4 Stacionárny prenos energie žiarením	64
3.3 PRENOS ENERGIE PRÚDENÍM A VEDENÍM	66
3.3.1 Teplotné pole	67
3.3.2 Fourierov zákon	67
3.3.3 Tepelná vodivosť látok	67
3.3.4 Ohrievanie cez deliacu stenu	68
3.3.5 Koeficient prestupu tepla	73
3.4 VÝMENNÍKY TEPLA	74
3.4.1 Rekuperačný výmenník tepla	74
3.4.2 Regeneračný výmenník tepla	77
3.4.3 Zmiešavací výmenník tepla	78
3.4.4 Tepelné rúrky	79
3.4.5 Solárny výmenník - kolektor	80
4 ZARIADENIA PRE CHLADENIE A SUŠENIE	85
4.1 CHLADENIE	85
4.1.1 Spôsoby chladenia	85
4.1.2 Parný chladiaci obeh	85
4.1.3 Sorpčný chladiaci obeh	88
4.1.4 Difúzny obeh	89
4.1.5 Atmosférické chladiče vody	89
4.1.6 Tepelné čerpadlo	89
4.1.7 Chladivá	90
4.1.8 Rozvod a akumulácia chladu	91
4.2 KLIMATIZÁCIA PROSTREDIA	92
4.2.1 Nízkotlakové klimatizačné zariadenie	92
4.2.2 Vysokotlakové klimatizačné zariadenie	93
4.3 ZÁKLADY TECHNIKY SUŠENIA	94
4.3.1 Základné pojmy v sušiarstve	94
4.3.2 Vlhkosť materiálu	95

4.3.3 Vázba vlhkosti v materiáli	95
4.3.4 Krivky sušenia	96
4.3.5 Sorpčná izoterma	97
4.3.6 Statika sušenia	98
4.3.7 Charakteristické ukazovatele	103
5 HYDROSTATIKA	105
5.1 TLAK V TEKUTINE	105
5.2 HYDROSTATICKÉ TLAKOVÉ SILY	106
5.2.1 Hydrostatická sila na vodorovnú plochu	106
5.2.2 Hydrostatická sila na šikmú rovinnú plochu	106
5.2.3 Hydrostatická sila na zvislú rovinnú plochu	108
5.3 RELATÍVNA ROVNOVÁHA KVAPALÍN	108
5.3.1 Zvislý pohyb nádoby	109
5.3.2 Vodorovný pohyb nádoby	110
5.4 ARCHIMEDOV ZÁKON	111
6 HYDRODYNAMIKA	113
6.1 ZÁKLADNÉ POJMY PRI PRIETOKU TEKUTÍN	113
6.2 KINEMATIKA PRÚDENIA TEKUTÍN	114
6.2.1 Rovnica kontinuity	114
6.3 DYNAMIKA PRÚDENIA TEKUTÍN	114
6.3.1 Základná pohybová rovnica	114
6.4 PRIETOK TEKUTINY POTRUBÍM	117
6.4.1 Druhy prúdenia tekutín	117
6.4.2 Objemový prietok a stredná rýchlosť prúdu	118
6.4.3 Straty pri prietoku tekutín potrubím	118
6.4.4 Meranie prietoku tekutín	122
6.4.5 Kavitácia	123
6.4.6 Viskozita tekutín	123
6.5 DYNAMICKE ÚČINKY PRÚDU TEKUTINY	125
6.5.1 Silový účinok vytekajúceho prúdu tekutiny na nádobu	126
6.5.2 Silový účinok voľného prúdu tekutiny na plochu	126
6.5.3 Silový účinok prúdu tekutiny na nehybný uzatvorený kanál	127
6.5.4 Obtekanie súmerných telies	129
6.5.5 Obtekanie nesúmerného telesa	130
6.5.6 Odpor vrstvy materiálu pri prietoku plynu	132
6.6 VÄZKOSŤ TEKUTINY, MEDZNÁ VRSTVA	133
7 ČERPADLÁ	134
7.1 HYDRODYNAMICKE ČERPADLÁ	134
7.1.1 Odstredivé čerpadlo – základné pracovné rovnice	135
7.1.2 Výkon, príkon a účinnosť čerpadla	138
7.1.3 Dovoľená nasávací výška	139
7.1.4 Činnosť odstredivého čerpadla pri zmenených otáčkach	141
7.1.5 Charakteristiky odstredivých čerpadiel	141

OBSAH

7.1.6 Charakteristika výtlačného potrubia	142
7.1.7 Regulácia prietoku v odstredivých čerpadlách	143
7.1.8 Labilné stavy činnosti odstredivých čerpadiel	144
7.1.9 Poruchy chodu čerpadiel	144
7.1.10 Axiálne čerpadlá	145
7.2 HYDROSTATICKE ČERPADLÁ S KMITAVÝM POHYBOM	145
7.3 HYDROSTATICKE ROTAČNÉ ČERPADLÁ	146
7.4 VODOKRUŽNÉ VÝVEVY	147
7.5 ŠPECIÁLNE ČERPADLÁ	148
7.5.1 Prúdové čerpadlá	148
7.5.2 Hydraulický baran	148
7.5.3 Monžíky – plynotlakové čerpadlá	149
7.5.4 Mamutové čerpadlo	149
7.5.5 Zdvižové závitovkové čerpadlo	149
7.5.6 Dávkovanie clonou	150
L I T E R A T Ú R A	151
P R Í L O H A	153
Metrologický doplnok	154
i-x diagram vlhkého vzduchu do 2500 °C	
i-x-w diagram vlhkého vzduchu a vlhkého materiálu	

POUŽITÉ OZNAČENIA

Symbol	Jednotka	Význam
a	m	dĺžka
a	m.s^{-2}	zrýchlenie
a	J.kg^{-1}	špecifická práca
a	$\text{kg.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$	odparivosť
a_n	J.kg^{-1}	špecifická (hmotnostná) anergia
A	J	práca
A	-	relatívna pohltivosť
A_n	J	anergia
b	m	šírka
C	J.K^{-1}	tepelná kapacita
c	J.kg.K^{-1}	hmotnostná tepelná kapacita
c	m.s^{-1}	rýchlosť
c_x	-	koefficient odporu
c	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$	koefficient žiarenia, koefficient vzájomného sáľania
d	m	priemer
D	-	relatívna priepustnosť
D	m	priemer
e	J.kg^{-1}	špecifická energia
e	W.m^{-2}	hustota žiarivého toku energie
e_x	J.kg^{-1}	špecifická (hmotnostná) exergia
E	J	energia
E	W	žiarivý tok energie
E_x	J	exergia
f	-	koefficient trenia
F	N	sila
g	m.s^{-2}	gravitačné zrýchlenie
G	N	tiaž
h	m	hlbka, výška
H	m	výška, spád
H_Q	N	prietoková hybnosť
i	J.kg^{-1}	špecifická (hmotnostná) entalpia
I	J	entalpia
I	W.m^{-2}	intenzita slnečného žiarenia
k	m	stredná drsnosť steny potrubia
k	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	koefficient prestupu tepla
k	-	koefficient konzistencie (tekutiny)
l	m	dráha, dĺžka
l	J.kg^{-1}	špecifické skupenské teplo
m	kg	hmotnosť
$\dot{m}$	kg.s^{-1}	hmotnostný tok
M	kg.mol^{-1}	molová hmotnosť
M_H	N.m	moment prietokovej hybnosti
n	-	polytropický exponent
n	mol	látkové množstvo

POUŽITÉ OZNAČENIA

n	-	index toku (tekutiny)
n	s^{-1} ; min^{-1}	otáčky
N	$kg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$	rýchlosť sušenia
O	m	zmáčaný obvod
p	Pa	tlak
Δp	Pa	pretlak, podtlak
P	W	výkon, príkon
q	$J \cdot kg^{-1}$	špecifické teplo
q_n	$J \cdot kg^{-1}$	výhrevnosť
q_v	$J \cdot kg^{-1}$	spaľovacie teplo
$\dot{q}$	$W \cdot m^{-2}$	hustota tepelného toku energie
Q	J	teplo
$\dot{Q}$	W	tepelný tok energie
$\dot{Q}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	objemový prietok
$\dot{Q}_0$	W	chladiaci výkon
r	m	polomer
r	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	špecifická plynová konštanta
R	-	relatívna odrazivosť
Re	-	Reynoldsovo číslo
R_h	m	hydraulický polomer
R_m	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	molárna plynová konštanta
s	m	hrúbka
s	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	špecifická (hmotnostná) entropia
S	$J \cdot K^{-1}$	entropia
S	m^2	plošný obsah prierezu, plocha
t	s	čas
t	°C	teplota v Celziovej stupnici
T	K	teplota v termodynamickej stupnici
u	$kg \cdot kg^{-1}$	absolútna vlhkosť látky
u	$J \cdot kg^{-1}$	špecifická (hmotnostná) vnútorná energia
u	$m \cdot s^{-1}$	rýchlosť, unášavá rýchlosť
U	J	vnútorná energia
U	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	koeficient prechodu tepla
v	$m \cdot s^{-1}$	rýchlosť
v	$m^3 \cdot kg^{-1}$	špecifický objem
V	m^3	objem
$\dot{V}$	$m^3 \cdot s^{-1}$	objemový prietok
x	m	vzdialenosť, súradnica
x	-	suchosť pary
x	$kg \cdot kg^{-1}$	merná vlhkosť vzduchu
w	$m \cdot s^{-1}$	rýchlosť
w	%	relatívna vlhkosť látky
y	m	hlbka vody, súradnica
Δy	$J \cdot kg^{-1}$	kavitačná depresia
Y	$J \cdot kg^{-1}$	špecifická energia kvapaliny, čerpadla

z	m	hĺbka, výška, súradnica
α	-	koeficient zúženia
α	K^{-1}	koeficient teplotnej dĺžkovej rozťažnosti
α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	koeficient prestupu tepla
α	-	koeficient kinetickej energie
α	$^{\circ}$	uhol (sklonu)
β	K^{-1}	rozpínavosť
β	$^{\circ}$	uhol
γ	K^{-1}	koeficient teplotnej objemovej rozťažnosti
δ	Pa^{-1}	stlačiteľnosť
δ	m	hrúbka medznej vrstvy
ε	-	chladiaci faktor
ε	-	relatívna žiarivosť
ε	-	koeficient expanzie
ζ	-	koeficient miestnych strát
ζ	-	opravný koeficient
η	-	účinnosť
η	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita
κ	-	izentropický exponent, Poissonova konštanta
κ	-	opravný koeficient
λ	-	koeficient trenia (v priamom potrubí)
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	koeficient tepelnej vodivosti
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	hustota
σ	$N \cdot m^{-1}$	povrchové napätie
τ	s	čas
τ	Pa	šmykové napätie
φ	-, %	relatívna vlhkosť vzduchu
ψ	-	opravný koeficient

Indexy - dolné

0	východzí stav
1	vztiahnutý k začiatku deja
2	vztiahnutý ku koncu deja
a	atmosférický
ad	adiabatický
c	celkový
Č	vztiahnutý k čerpadlu
d	dopravný
el	elektrický
ef	efektívny
h	hydrostatický
h	hydraulický
k	vztiahnutý ku kvapaline (kondenzátu)
LS	vztiahnutý k suchému prostrediu
m	mechanický
mp	vztiahnutý k mokrej pare

POUŽITÉ OZNAČENIA

M	vztiahnutý k materiálu
MS	vztiahnutý k sušine
n	polytropický dej
n	vztiahnutý k anergii
p	pri konštantnom tlaku
p	vztiahnutý k pare
pr	vztiahnutý k prehriatej pare
pt	vztiahnutý k potrubiu
Q	vztiahnutý k prietokovej hybnosti
s	vztiahnutý k zmesi
s	vztiahnutý k povrchu steny
s	statický
SV	suchý vzduch
t	technická (napr. práca)
t	tepelná (napr. účinnosť)
v	vztiahnutý k vode, príp. k vzduchu
v	objemová (napr. účinnosť)
vak	vákuometrický
V	pri konštantnom objeme
V	vztiahnutý k vlhkosti
VV	vlhký vzduch
w	vztiahnutý k pare
x	vztiahnutý k exergii
z	stratový
1+x	vztiahnutý k vlhkému vzduchu

Indexy - horné

<i>l</i>	vztiahnutý k vriacej (sýtej) kvapaline
<i>l</i>	hodnoty pri zmenených otáčkach
<i>ll</i>	vztiahnutý k sýtej pare (bodu nasýtenia)

Značky

A	absorbér
Č	čerpadlo
G	generátor (vypudzovač)
Ch	chladič
K	kompresor
K	kritický bod
O	ohrievač
P	adiabatická práčka
R	rovnovážny bod
RV	redukčný ventil
T	tŕažisko
TB	trojný bod
V	ventilátor
V	výparník
Z	kondenzátor (zrážnik)

PREDHOVOR

Vysokoškolská učebnica, ktorá sa Vám dostáva do rúk, je určená študentom technického zamerania a zaoberá sa, ako vyplýva z názvu, významnou technickou problematikou.

Teplototechnika a hydrotechnika sú vedeckými a technickými odbormi, ktoré sa uplatňujú v mnohých ďalších odboroch. *Teplototechnika* je vedný odbor, ktorý sa zaoberá strojmi a zariadeniami pracujúcimi na termomechanických princípoch. *Termomechanika* je veda, ktorá skúma deje, pri ktorých sa uplatňuje tepelný tok energie a jeho prípadné premeny na prácu. Delí sa na termodynamiku a termokinetiku. *Termodynamiku* môžeme považovať za univerzálnu fyzikálnu teóriu z pohľadu jej rozmanitých aplikácií. Analyzuje tepelné toky, pri ktorých sa teplo transformuje na prácu a naopak práca vyvoláva vynútené tepelné toky. Môže byť teoretická, technická a chemická. Predmetom nášho štúdia je *technická termodynamika*. *Termokinetika* analyzuje tepelné toky bez ich premeny na prácu. Termomechanika sa zaoberá problémami, ktoré majú zásadný význam aj v súvislosti so zabezpečovaním energie a v jej hospodárnom a ekologickom využívaní.

Hydrotechnika je vedný odbor, ktorý sa zaoberá strojmi a zariadeniami pracujúcimi na hydromechanických princípoch. Mechanika kvapalín je jednou z najstarších vied. Prvá písomná pamiatka z hydromechaniky pochádza asi z roku 250 pred n. l. a je ňou známy Archimedov zákon. Mechanika kvapalín – hydromechanika – sa delí na hydrostatiku a hydrodynamiku. *Hydrostatika* sa zaoberá rovnováhou kvapalín (tekutín) v relatívnom pokoji. *Hydrodynamika* sa zaoberá pohybom tekutín a ich pôsobením na tuhé telesá pri ich vzájomnom relatívnom pohybe. *Hydraulika* je aplikovaná hydromechanika zameraná na riešenie technických úloh.

Cieľom vysokoškolskej učebnice je podať zásadné informácie z uvedených vedných odborov predovšetkým študentom Technickej fakulty, ktoré im umožnia zvládnuť problematiku na nadväzujúcich predmetoch. Štúdium uvedenej problematiky nie je jednoduché pre pomerne značný rozsah i rôznorodosť látky a nutnosť neustálej aplikácie základných zákonov a princípov. V texte sa nachádza relatívne vysoký podiel rovníc. Tu je však potrebné si uvedomiť, že ich riešenie je založené na niekoľkých základných vzťahoch a všetky ďalšie je možné odvodiť pri základných vedomostiach z matematiky.

Namiesto predtým používaných „merných“ jednotiek sú jednotky veličín vzťahované na 1 kg, prípadne m^3 , uvádzané ako „hmotnostné“, „objemové“ alebo „špecifické“. Novo zaradená je kapitola Metrologický doplnok, kde sú uvedené základné definície jednotiek SI sústavy, predpony a ich značky, prepočty vybraných anglo-amerických jednotiek i prehľad vybraných historických jednotiek.

Za čas strávený pri recenzii učebnice, za precízne posúdenie textu, cenné odborné i didaktické pripomienky ďakujeme prof. Ing. Radomírovi Adamovskému, DrSc. a prof. Ing. Antonovi Žiklovi, CSc.

Srdečne ďakujeme kolektívu Vydavateľstva SPU v Nitre za technickú a grafickú pomoc pri zostavení publikácie, spolupracovníkom na katedre a všetkým, ktorí prispeli k vydaniu tejto publikácie. *Ďakujeme za umožnenie jej vydania.*

Nitra 2020

Autori

IVAN VITÁZEK, ZDENKO TKÁČ

TEPLOTECHNIKA A HYDROTECHNIKA

Vydala: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre

Vydanie: prvé

Náklad: 50 ks

Rok vydania: 2020

Návrh obálky: Martin Lopušný

AH-VH: 9,08-9,32

Neprešlo redakčnou úpravou vo Vydavateľstve SPU v Nitre.

ISBN 978-80-552-2160-1