



# Sestavení výpočetního programu pro výpočet základních vratných změn stavu v ideálním plynu

Bakalářská práce

**Studijní program:** B2301 – Strojní inženýrství

**Studijní obor:** 2301R000 – Strojní inženýrství

**Autor práce:** Adam Buriánek

**Vedoucí práce:** Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adam Buriánek**  
Osobní číslo: **S12000031**  
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Strojní inženýrství**  
Název tématu: **Sestavení výpočetního programu pro výpočet základních vratných změn stavu v ideálním plynu**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je sestavit výpočetní program, který by pro zadaný děj a zadaný plyn počítal základní stavové a procesní veličiny.

1. Uveďte přehled základních vratných změn stavu v ideálním plynu a všech vztahů potřebných k jejich výpočtu.
2. Sestavte výpočetní program pro výpočet dějů.
3. Odladte sestavený výpočetní program.
4. Ilustrujte funkčnost sestaveného programu na několika příkladech.

Rozsah grafických prací: -  
Rozsah pracovní zprávy: **25 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**  
Seznam odborné literatury:

[1] **STŘEDA, I., 1998. Základy rovnovážné termodynamiky. Technická univerzita v Liberci.**


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Magda Vestfálová, Ph.D.**  
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **18. listopadu 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **18. února 2017**

  
prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



  
doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 18. listopadu 2015

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 24.6.2017

Podpis: 

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat Ing. Magdě Vestfálové, Ph.D. za cenné rady, velikou trpělivost a vstřícnost během konzultací. Velký dík patří rovněž mé rodině a přítelkyni Kateřině Novotné za podporu během studia a při psaní této bakalářské práce.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na sestavení výpočetního programu pro výpočet základních vratných změn stavu v ideálním plynu. Teoretická část zahrnuje popis základních stavových veličin, procesních veličin a energetických stavových veličin. Následně se tato část zabývá základními zákony termodynamiky a vysvětluje model ideálního plynu. Závěr teoretické části se zaměřuje na popis základních vratných změn stavu v ideálním plynu. V praktické části jsou uvedeny algoritmy výpočtu. Dále jsou součástí bakalářské práce přílohy, ve kterých je vytvořen návod jak program používat a ve kterých je ilustrována funkčnost programu.

## **Klíčová slova**

rovnovážná termodynamika, základní vratné změny stavu, ideální plyn, výpočetní program

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the compilation of a calculation program for the calculation of the basic return changes in the ideal gas. The theoretical part includes description of basic status variables, process variables and energy status variables. Subsequently, this part deals with the laws of basic thermodynamics and explains the ideal gas model. The conclusion of the theoretical parts deals with the description of the basic return changes in the ideal gas. The practical part presents algorithms of calculation. They are also part of the bachelor thesis supplement, in which there are instructions how to use the program and in which the functionality of the program is illustrated.

## **Keywords**

equilibrium thermodynamic, basic reversible process of state, ideal gas, computing program

## Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| PŘEHLED POUŽITÉHO OZNAČENÍ VELIČIN.....  | 9         |
| PŘEHLED POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH KONSTANT .....   | 10        |
| PŘEHLED POUŽITÝCH INDEXŮ .....   | 10        |
| PŘEHLED POUŽITÝ CHEMICKÝCH ZNAČEK .....  | 10        |
| PŘEHLED OSTATNÍHO POUŽITÉHO OZNAČENÍ.....  | 10        |
| <b>1 ÚVOD.....</b>   | <b>12</b> |
| 1.1 REŠERŠE DOSTUPNÝCH PROGRAMŮ.....   | 12        |
| <b>2 FYZIKÁLNÍ PRINCIPY UPLATNĚNÉ PŘI VÝPOČTU .....</b>                              | <b>13</b> |
| 2.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....   | 13        |
| 2.2 OBJEMOVÁ PRÁCE .....   | 13        |
| 2.3 TECHNICKÁ PRÁCE .....  | 15        |
| 2.4 TEPLO .....  | 17        |
| 2.5 VNITŘNÍ ENERGIE A ENTALPIE.....  | 17        |
| 2.6 ZÁKONY TERMODYNAMIKY.....  | 18        |
| 2.6.1 I. zákon termodynamiky.....  | 18        |
| 2.6.2 II. zákon termodynamiky, entropie .....  | 20        |
| 2.7 MODEL IDEÁLNÍHO PLYNU .....  | 21        |
| 2.7.1 Stavová rovnice ideálního plynu .....  | 22        |
| 2.7.2 Základní měrné tepelné kapacity, Poissonova konstanta.....                     | 23        |
| 2.7.3 Vnitřní energie a entalpie ideálního plynu.....                                | 24        |
| 2.8 ZÁKLADNÍ VRATNÉ ZMĚNY STAVU V IDEÁLNÍM PLYNU .....                               | 25        |
| 2.8.1 Izochorická vratná změna stavu ideálního plynu .....                           | 25        |
| 2.8.2 Izobarická vratná změna stavu ideálního plynu.....                             | 27        |
| 2.8.3 Izotermická vratná změna stavu ideálního plynu .....                           | 29        |
| 2.8.4 Izoentropická (vratná adiabatická) změna stavu ideálního plynu.....            | 31        |
| <b>3 VOLBA PROGRAMU MICROSOFT VISUAL STUDIO A PROGRAMOVACÍHO<br/>JAZYKU C# .....</b> | <b>34</b> |
| <b>4 ALGORITMY VÝPOČTU .....</b>   | <b>35</b> |
| 4.1 URČENÍ VLASTNOSTÍ PLYNU.....   | 35        |
| 4.1.1 Volba ze seznamu .....   | 35        |
| 4.1.2 Manuální zadání.....   | 35        |
| 4.2 ALGORITMY PRO VÝPOČET ZÁKLADNÍCH STAVOVÝCH VELIČIN IDEÁLNÍHO PLYNU....           | 36        |
| 4.2.1 Izochorická vratná změna stavu ideálního plynu $v_1 = v_2 = v = konst.$ .....  | 36        |
| 4.2.2 Izobarická vratná změna stavu ideálního plynu $p_1 = p_2 = p = konst.$ .....   | 37        |

|       |  |           |
|-------|--|-----------|
| 4.2.3 | <i>Izotermická vratná změna stavu ideálního plynu <math>T_1 = T_2 = T = \text{konst.}</math></i> .....                   | 38        |
| 4.2.4 | <i>Izoentropická (vratná adiabatická) změna stavu ideálního plynu (<math>s_1 = s_2 = s = \text{konst.}</math>)</i> ..... | 40        |
| 4.3   | VÝPOČET ZMĚN ENERGETICKÝCH STAVOVÝCH VELIČIN IDEÁLNÍHO PLYNU .....   | 41        |
| 4.3.1 | <i>Změna vnitřní energie a entalpie</i> .....  | 41        |
| 4.3.2 | <i>Změna entropie</i> .....  | 42        |
| 4.4   | VÝPOČET PROCESNÍCH VELIČIN.....  | 42        |
| 4.4.1 | <i>Objemová práce</i> .....  | 42        |
| 4.4.2 | <i>Technická práce</i> .....   | 42        |
| 4.4.3 | <i>Teplo</i> .....   | 42        |
| 4.5   | PŘEVOD JEDNOTEK .....  | 43        |
|       | <b>ZÁVĚR</b> .....   | <b>44</b> |
|       | <b>LITERATURA A SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....  | <b>45</b> |
|       | <b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....   | <b>I</b>  |
|       | PŘÍLOHA 1: NÁVOD PRO POUŽITÍ VÝPOČETNÍHO PROGRAMU .....  | II        |
|       | PŘÍLOHA 2: ILUSTRACE FUNKČNOSTI PROGRAMU .....   | XIV       |



## Přehled použitého označení veličin

| značka   | veličina                           | jednotka                 |
|----------|------------------------------------|--------------------------|
| A        | plocha                             | $m^2$                    |
| $c_p$    | izobarická měrná tepelná kapacita  | $\frac{J}{kg \cdot K}$   |
| $c_v$    | izochorická měrná tepelná kapacita | $\frac{J}{kg \cdot K}$   |
| F        | síla                               | N                        |
| h        | měrná entalpie                     | $\frac{J}{kg}$           |
| H        | entalpie                           | J                        |
| m        | hmotnost                           | kg                       |
| M        | molární hmotnost                   | $\frac{kg}{kmol}$        |
| p        | tlak                               | Pa                       |
| q        | měrné teplo                        | $\frac{J}{kg}$           |
| Q        | teplo                              | J                        |
| r        | měrná plynová konstanta            | $\frac{J}{kg \cdot K}$   |
| R        | univerzální plynová konstanta      | $\frac{J}{kmol \cdot K}$ |
| s        | měrná entropie                     | $\frac{J}{kg \cdot K}$   |
| S        | entropie                           | $\frac{J}{K}$            |
| t        | teplota                            | $^{\circ}C$              |
| T        | termodynamická teplota             | K                        |
| u        | měrná vnitřní energie              | $\frac{J}{kg}$           |
| U        | vnitřní energie                    | J                        |
| v        | měrný objem                        | $\frac{m^3}{kg}$         |
| V        | celkový objem                      | $m^3$                    |
| w        | měrná objemová práce               | $\frac{J}{kg}$           |
| W        | objemová práce                     | J                        |
| $w_t$    | měrná technická práce              | $\frac{J}{kg}$           |
| $W_t$    | technická práce                    | J                        |
| x        | dráha, vzdálenost                  | m                        |
| $\kappa$ | Poissonova konstanta               | 1                        |
| $\rho$   | hustota                            | $\frac{kg}{m^3}$         |

## Přehled použitých fyzikálních konstant

$$R = 8314 \frac{J}{\text{kmol} \cdot K} \quad \text{univerzální plynová konstanta}$$

## Přehled použitých indexů

| index | význam                               |
|-------|--------------------------------------|
| 1     | stav látky (počáteční <sup>1</sup> ) |
| 2     | stav látky (konečný <sup>2</sup> )   |
| 01    | děj mezi stavem 0 a 1                |
| 12    | děj mezi stavem 1 a 2                |
| 23    | děj mezi stavem 2 a 3                |
| kr    | kritická hodnota                     |
| p     | při konstantním tlaku                |
| v     | při konstantním objemu               |

## Přehled použitých chemických značek

| značka                         | význam        |
|--------------------------------|---------------|
| C                              | uhlík         |
| CO <sub>2</sub>                | oxid uhličitý |
| CH <sub>4</sub>                | methan        |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | ethan         |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | propan        |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | butan         |
| H                              | vodík         |
| He                             | helium        |
| N                              | dusík         |
| NH <sub>3</sub>                | amoniak       |
| Ne                             | neon          |
| O                              | atom kyslíku  |
| O <sub>2</sub>                 | kyslík        |
| O <sub>3</sub>                 | ozón          |

## Přehled ostatního použitého označení

| značka | význam                   |
|--------|--------------------------|
| k      | kapalné skupenství látky |

---

<sup>1</sup> Pouze v kapitole 2.3 je výjimka a index 1 neoznačuje počáteční stav látky.

<sup>2</sup> Pouze v kapitole 2.3 je výjimka a index 2 neoznačuje konečný stav látky.

|    |                         |
|----|-------------------------|
| kr | kritický bod            |
| p  | plynné skupenství látky |
| t  | tuhé skupenství látky   |
| tr | trojný bod              |

# 1 Úvod

Cílem bakalářské práce je sestavit výpočetní program pro výpočet základních vratných změn stavu v ideálním plynu, který by měl sloužit jako pomůcka při studiu předmětu Termodynamika a sdílení tepla, jenž je vyučován Katedrou energetických zařízení na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci. Dalším cílem bakalářské práce je dát studentům nástroj, který jim bude sloužit jako bezpečná kontrola při výpočtech základních vratných změn stavu v ideálním plynu.

Teoretická část bakalářské práce bude popisovat fyzikální podstatu řešeného problému. K tomu, aby uživatel mohl program správně používat, je nutné aby měl určité minimum znalostí z oblasti termodynamiky, které bude shrnuto v úvodní kapitole této práce.

Praktická část bakalářské práce se bude zabývat programováním, a jelikož je tato práce psána pro Katedru energetických zařízení, tak se v ní nebude vyskytovat zdrojový kód, vývojový diagram a ani řídicí struktura. Z hlediska programování bude řešena funkčnost programu a v práci budou uvedeny pouze algoritmy řešení, na jejichž základech program funguje.

## 1.1 Rešerše dostupných programů

Jedním z hlavních důvodů, proč je na toto téma psána bakalářská práce, je to, že žádný program stejného nebo podobného typu není dostupný z českých veřejně dosažitelných internetových zdrojů. Termodynamika či předmět s podobným obsahem je vyučován na Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze [1], Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně [2], Fakultě strojní Vysoké školy Báňské - Technické univerzity v Ostravě [3], Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni [4], Fakultě výrobních technologií a managementu Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem [5]. Dle mého názoru byly výpočetní programy podobného typu již vytvořeny, avšak žádná z uvedených vysokých škol je v současnosti nedává volně k dispozici.

Dalším předmětem rešerše byly vysokoškolské odborné práce, které bylo hledáno v internetových databázích [6], [7], [8], [9], [10], [11] na již zmíněných vysokých školách. Jediný přijatelný rezultat byl získán při nalezení bakalářské práce studenta Jakuba Zábojníka z Energetického ústavu VUT [7], jejíž zadání je téměř identické s tímto zadáním, ačkoliv výsledek není samostatně fungující program typu \*.exe, ale knihovna funkcí. Volně ke stažení je kromě textu bakalářské práce i knihovna funkcí. Tuto knihovnu si může uživatel otevřít v programu MATLAB a celkem pohodlně počítat. Nevýhodou tohoto řešení je, že uživatel musí mít nainstalovaný program MATLAB.

## 2 Fyzikální principy uplatněné při výpočtu

### 2.1 Základní pojmy

Termodynamické veličiny dělíme na procesní a stavové veličiny. Procesní veličiny jsou veličiny, které jsou závislé na tom, jak děj probíhá, zatímco stavové veličiny na průběhu děje nezávisí a popisují stav termodynamického systému [12].

Pomocí základních stavových veličin určujeme stav termodynamického systému. Mezi základní stavové veličiny patří tlak, teplota a objem.

Tlak  $p$  [Pa] lze definovat pomocí elementární síly působící kolmo na plochu

$$p = \frac{dF}{dA}. \quad (2.1)$$

Ve výpočetním programu rozlišujeme termodynamickou teplotu  $T$  [K] a teplotu (Celsiovu)  $t$  [°C]. Jednotka kelvin [K] je stejně velká jako stupeň Celsiův [°C], avšak každá má jinak definovanou nulu teplotní stupnice. Převod mezi termodynamickou a Celsiovou teplotou je dán rovnicí

$$T = 273,15 + t. \quad (2.2)$$

Termodynamické veličiny dále rozdělujeme na intenzitní a extenzitní. Intenzitní veličiny nezávisí na množství látky v systému, oproti tomu extenzitní veličiny na množství látky v systému závisí [12].

Jednoznačné množství látky v systému budeme určovat hmotností  $m$  [kg]. Za pomoci hmotnosti lze ke každé extenzitní (celkové) veličině přiřadit veličinu intenzitní (měrnou) [12]. Příkladem může být objem  $V$  [m<sup>3</sup>] (extenzitní veličina) a k němu přiřazený měrný objem  $v$  [ $\frac{m^3}{kg}$ ] (intenzitní veličina)

$$v = \frac{V}{m}. \quad (2.3)$$

Převrácenou hodnotou měrného objemu je hustota  $\rho$  [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

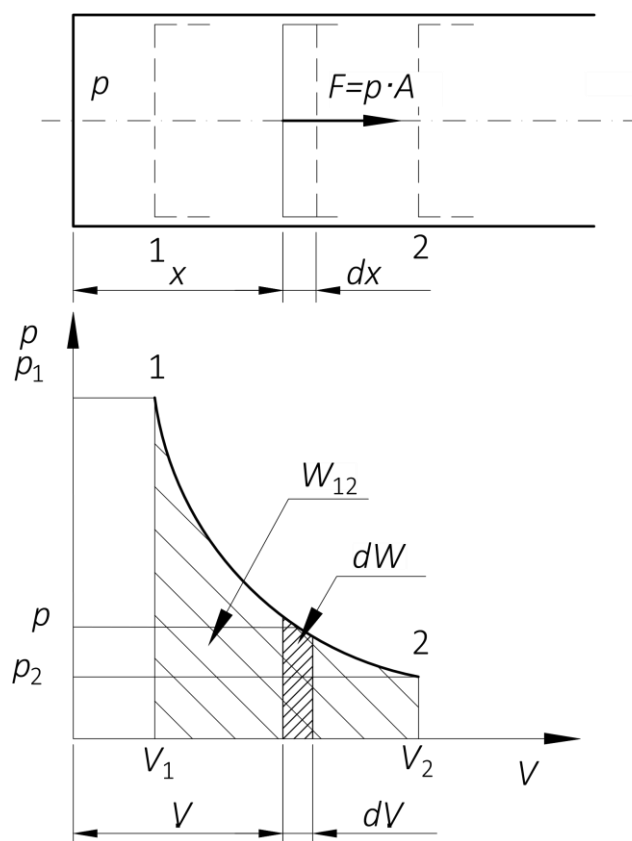
$$\rho = \frac{1}{v}. \quad (2.4)$$

### 2.2 Objemová práce

Objemová práce je procesní veličinou a je formou energie přenášenou mezi systémem a okolím. Lze jí popsat pomocí expanze či komprese plynu během jednorázového průběhu jednoduchého děje [12].

Objemovou práci  $W$  [J] můžeme odvodit na příkladu expanze plynu v pístovém stroji (viz obrázek 1). Na počátku expanze ve stavu 1 má plyn objem  $V_1$  [m<sup>3</sup>] při tlaku  $p_1$  [Pa]. Během expanze plynu mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2 působí na píst o ploše  $A$  [m<sup>2</sup>] síla  $F$  [N] =  $p \cdot A$ . Při posuvu pístu hodnota tlaku plynu  $p$  [Pa] klesá a objem  $V$  roste. Ve stavu 2 zaujímá plyn objem  $V_2$  [m<sup>3</sup>] při tlaku  $p_2$  [Pa]. V obecné poloze  $x$  se vlivem síly  $F$  píst posouvá přímočarým pohybem právě o elementární dráhu  $dx$  a plyn vykonává elementární práci  $dW$  [12].

Představu o konání objemové práce lze získat jejím zobrazením v  $p - V$  diagramu (viz obrázek 1), kde na svislou osu vynášíme tlak  $p$ , na vodorovnou osu objem  $V$  a objemovou práci pak můžeme nalézt jako plochu pod křivkou průběhu děje. Právě proto se  $p - V$  diagram nazývá pracovním diagramem<sup>3</sup>. Práci, kterou plyn koná, považujeme za kladnou.



**Obrázek 1:** Objemová práce v pracovním diagramu [12]

Na základě úvahy o expanzi plynu v pístovém stroji lze vyjádřit elementární práci

$$dW = F \cdot dx = p \cdot A \cdot dx, \quad (2.5)$$

kde součin plochy pístu  $A$  a elementární dráhy  $dx$  je roven elementární změně objemu  $dV$

$$dV = A \cdot dx. \quad (2.6)$$

Dosazením z rovnice (2.6) do rovnice (2.5) dostáváme vztah pro výpočet objemové práce v diferenciálním tvaru

$$dW = p \cdot dV \quad (2.7)$$

a integrováním předchozí rovnice

$$\int_1^2 dW = \int_1^2 p \cdot dV \quad (2.8)$$

získáme integrální vztah pro výpočet celkové objemové práce

---

<sup>3</sup> V pracovním diagramu můžeme vynášet i měrný objem a jako plocha pod křivkou průběhu děje se nám zcela logicky vyobrazí měrná objemová práce.

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV. \quad (2.9)$$

Vztah pro výpočet měrné objemové práce v diferenciálním tvaru zní

$$dw = p \cdot dv. \quad (2.10)$$

Vztah pro výpočet měrné objemové práce  $w_{12} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  v integrálním tvaru zní

$$w_{12} = \int_1^2 p \cdot dv. \quad (2.11)$$

*Poznámka:*

Ve skutečnosti by plyn během expanze vykonal menší objemovou práci. Pro předchozí úvahy jsme uvažovali, že expanze proběhla za podmínky mechanické rovnováhy s okolím, což by ve skutečnosti neplatilo, a proto předchozí rovnice platí pouze pro vratné děje, které budeme nadále uvažovat.

### 2.3 Technická práce

Technická práce je podobně jako objemová práce procesní veličinou a je formou energie přenášenou mezi systémem a okolím. Technická práce je trvale opakovatelnou prací [12].

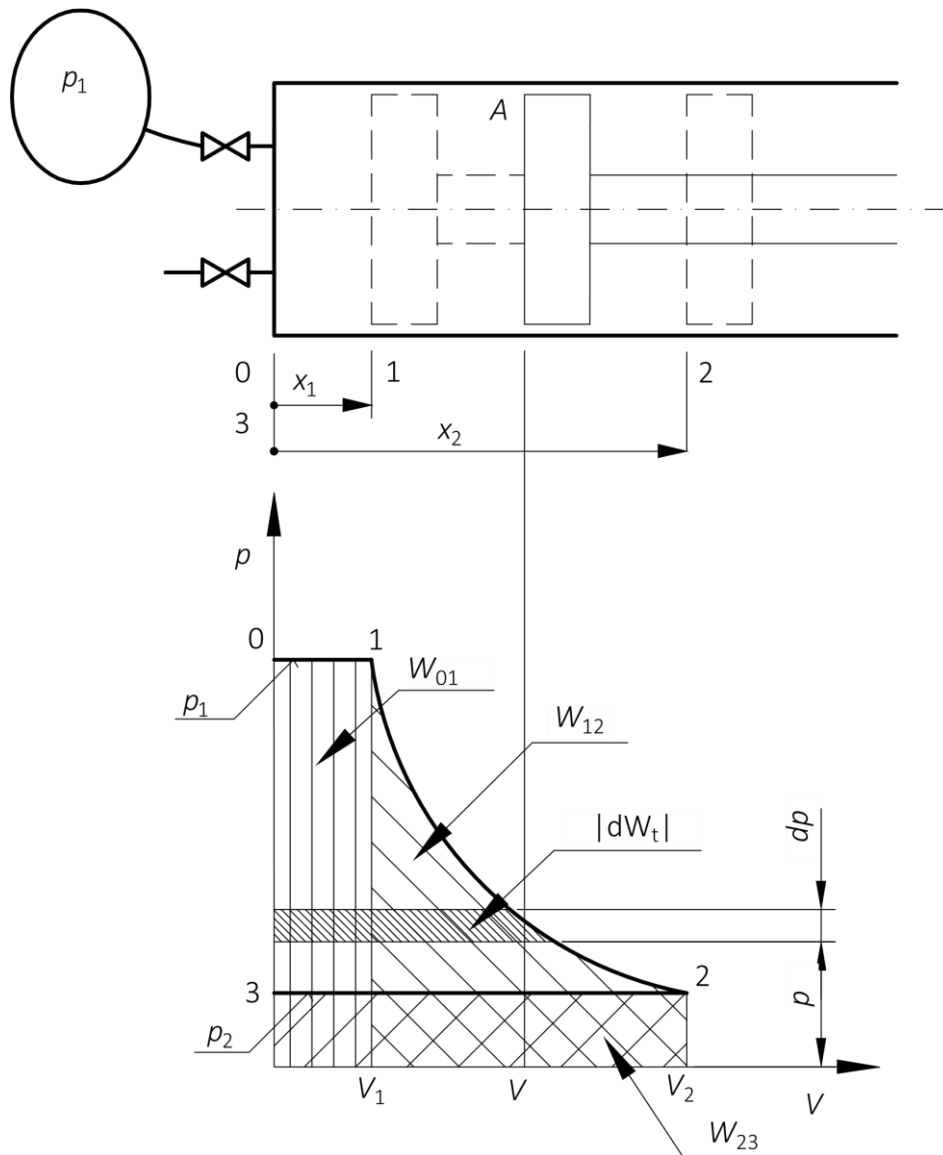
Můžeme si ji vysvětlit na příkladu motoru na stlačený vzduch a zobrazit v pracovním diagramu (viz obrázek 2) [12], [13]. Během expanze ze stavu 1 do stavu 2 předpokládáme konstantní množství vzduchu  $m = konst.$

0 – 1: Po otevření sacího ventilu se píst pohybuje směrem doprava přímočarým pohybem z levé krajní polohy 0 (prázdný válec) do polohy 1 ve vzdálenosti  $x_1$  (konec plnění) a válec se plní vzduchem při tlaku  $p_1$ . Během plnění válce působí na píst konstantní síla  $F = p_1 \cdot A$ . V okamžiku dosažení pístu polohy 1, je množství vzduchu ve válci rovno objemu  $V_1$  a zavře se sací ventil. Píst ve válci během plnění vykonal práci  $W_{01}$  [12], [13].

1 – 2: Po uzavření sacího ventilu plyn expanduje, a tudíž se píst pohybuje dál až do pravé krajní polohy 2 o vzdálenost  $x_2$  od levé krajní polohy 0 (je dosaženo maximálního možného objemu vzduchu  $V_2$  ve válci). Při posuvu pístu tlak klesá z hodnoty  $p_1$  na hodnotu  $p_2$  a objem stoupá z hodnoty  $V_1$  na hodnotu  $V_2$ . Během expanze plyn vykonal práci  $W_{12}$  [12], [13].

2 – 3: Po dosažení pravé krajní polohy 2 se otevře výfukový ventil. Následně při konstantním tlaku  $p_2$  působíme na píst silou  $F = p_2 \cdot A$ , píst se posouvá doleva přímočarým pohybem z polohy 2 do polohy 3, dochází k výfuku plynu a zmenšování objemu  $V$ . Ve stavu 3 je píst v levé krajní poloze stejně jako ve stavu 0. Po dosažení polohy 3 a úplném vyprázdnění válce se uzavře výfukový ventil. Na výfuk plynu z válce plyn spotřeboval práci  $W_{23}$  [12], [13].

Následným otevřením sacího ventilu se může celý cyklus znovu opakovat [12], [13].



**Obrázek 2:** Technická práce v pracovním diagramu [12]

Při plnění válce plyn koná práci

$$W_{01} = F_1 \cdot x_1 = p_1 \cdot A \cdot x_1 = p_1 \cdot V_1. \quad (2.12)$$

Během expanze plyn koná práci, která je rovna

$$W_{12} = \int_1^2 p \cdot dV. \quad (2.13)$$

Při vyprazdňování plynu z válce plyn spotřebuje práci

$$W_{23} = -p_2 \cdot A \cdot x_2 = -p_2 \cdot V_2. \quad (2.14)$$

Práce vykonaná během jednoho cyklu je rovna součtu dílčích prací

$$W = W_{01} + W_{12} + W_{23}, \quad (2.15)$$

po dosazení z rovnic pro dílčí práce (2.12), (2.13), (2.14) získáme integrální tvar

$$W = p_1 \cdot V_1 + \int_1^2 p \cdot dV - p_2 \cdot V_2 = \quad (2.16)$$



$$\begin{aligned}
&= \int_1^2 p \cdot dV - (p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1) = \\
&= \int_1^2 p \cdot dV - \int_1^2 d(p \cdot V) = \\
&= \int_1^2 p \cdot dV - \int_1^2 p \cdot dV - \int_1^2 V \cdot dp = - \int_1^2 V \cdot dp.
\end{aligned}$$

Poslední integrovaný výraz má charakter práce, nazýváme ho technickou prací  $dW_t$  [J]

$$dW_t = -V \cdot dp \quad (2.17)$$

a integrováním předchozí rovnice

$$\int_1^2 dW_{t12} = - \int_1^2 V \cdot dp, \quad (2.18)$$

získáme vztah pro výpočet technické práce

$$W_{t12} = - \int_1^2 V \cdot dp. \quad (2.19)$$

Vztah pro výpočet měrné technické práce v diferenciálním tvaru zní

$$dw_t = -v \cdot dp. \quad (2.20)$$

Vztah pro výpočet měrné technické práce  $w_t$   $\left[ \frac{J}{kg} \right]$  v integrálním tvaru zní

$$w_{t12} = - \int_1^2 v \cdot dp. \quad (2.21)$$

*Poznámka:*

Veškeré předcházející úvahy platí pouze pro vratné děje (viz poznámka v kapitole 2.2).

## 2.4 Teplo

Teplo je procesní veličina a je formou energie přenášenou mezi systémem a okolím. Je-li teplo  $Q$  [J] dodáváno systému, považujeme ho za kladné [12].

## 2.5 Vnitřní energie a entalpie

Vnitřní energie je extenzitní energetickou stavovou veličinou vyjadřující termodynamickou energii systému. Vnitřní energii  $U$  [J] je možné pro jednosložkové jednofázové látky vyjádřit například jako funkci nezávisle proměnných objemu a teploty

$$U = U(V, T). \quad (2.22)$$

Pomocí termodynamické stavové rovnice můžeme vyjádřit změnu vnitřní energie

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \cdot dT + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T \cdot dV. \quad (2.23)$$

Podobně můžeme vyjádřit změnu měrné vnitřní energii  $du$   $\left[ \frac{J}{kg} \right]$

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \cdot dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \cdot dv. \quad (2.24)$$

Entalpie je extenzitní energetická stavová veličina a jiným způsobem vyjadřuje energii systému. Entalpii lze definovat jako součet celkové vnitřní a vnější (tlakové) energie  $p \cdot V$

$$H = U + p \cdot V. \quad (2.25)$$

Entalpii  $H [J]$  je možné pro jednosložkové jednofázové látky vyjádřit například jako funkci nezávisle proměnných tlaku a teplotě

$$H = H(p, T). \quad (2.26)$$

Pomocí termodynamické stavové rovnice můžeme vyjádřit změnu entalpie

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T \cdot dp. \quad (2.27)$$

Podobně můžeme vyjádřit změnu měrné entalpie  $dh \left[\frac{J}{kg}\right]$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \cdot dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \cdot dp. \quad (2.28)$$

## 2.6 Zákony termodynamiky

Rovnovážná termodynamika je definována pomocí nultého, prvního, druhého a třetího zákona. Zákony termodynamiky byly definovány experimentálně, na základě dlouhodobého pozorování termodynamických jevů [12], [13]. V našem výpočetním programu je využit pouze I. a II. zákon.

### 2.6.1 I. zákon termodynamiky

I. zákon termodynamiky je ve své podstatě zákonem zachování energie uplatněným pro termodynamický systém. Pro naše výpočty budeme tento zákon využívat ve dvou různých tvarech. Jednoduše lze říci, že energie nevzniká ani nezaniká, pouze se její jednotlivé formy vzájemně transformují. Teplo dodávané systému můžeme využít na vzrůst vnitřní energie a dodání práce [12].

První tvar I. zákona termodynamiky lze definovat v následujícím diferenciálním tvaru

$$dQ = dU + dW. \quad (2.29)$$

Integrací předchozí rovnice

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dU + \int_1^2 dW, \quad (2.30)$$

dostáváme první tvar I. zákona termodynamiky v integrálním tvaru

$$Q_{12} = (U_2 - U_1) + W_{12},$$

resp.

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + W_{12}, \quad (2.31)$$

kde přenesené teplo  $Q_{12}$  mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2 je rovné součtu změny vnitřní energie  $\Delta U_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 a vykonané objemové práce  $W_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2.

Pro měrné veličiny lze vyjádřit první tvar I. zákona termodynamiky v diferenciálním tvaru

$$dq = du + dw. \quad (2.32)$$

Pro měrné veličiny lze vyjádřit první tvar I. zákona termodynamiky v integrálním tvaru

$$q_{12} = \Delta u_{12} + w_{12}, \quad (2.33)$$

kde  $q_{12} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  je měrné teplo přenesené mezi stavem 1 a stavem 2,  $\Delta u_{12} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  je změna měrné vnitřní energie mezi stavem 1 a stavem 2 a  $\Delta w_{12} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  je měrná objemová práce vykonaná mezi stavem 1 a stavem 2.

I. zákon termodynamiky lze vyjádřit pomocí entalpie (2.25). Abychom mohli tuto rovnici použít, musíme jí zderivovat

$$dH = dU + d(p \cdot V) = dU + p \cdot dV + V \cdot dp, \quad (2.34)$$

poté můžeme ze zderivované rovnice vyjádřit diferenciál vnitřní energie

$$dU = dH - p \cdot dV - V \cdot dp. \quad (2.35)$$

Dosazením předchozí rovnice do I. zákona termodynamiky v prvním tvaru (2.29) dostaneme

$$dQ = dU + dW = dH - p \cdot dV - V \cdot dp + dW, \quad (2.36)$$

kde za diferenciál objemové práce dosadíme z rovnice (2.7)

$$dQ = dH - p \cdot dV - V \cdot dp + p \cdot dV. \quad (2.37)$$

Sčítanec  $-V \cdot dp$  je roven diferenciálu technické práce  $dW_t$  z rovnice (2.17).

Druhý tvar I. zákona termodynamiky v diferenciálním tvaru pro celkové veličiny zní

$$dQ = dH + dW_t. \quad (2.38)$$

Integrací předchozí rovnice

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dH + \int_1^2 dW_t, \quad (2.39)$$

dostáváme druhý tvar I. zákona termodynamiky v integrálním tvaru

$$Q_{12} = (H_2 - H_1) + W_{t12},$$

resp.

$$Q_{12} = \Delta H_{12} + W_{t12}, \quad (2.40)$$

kde přenesené teplo  $Q_{12}$  mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2 je rovné součtu změny entalpie  $\Delta H_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 a technické práce  $W_{t12}$  vykonaná mezi stavem 1 a

stavem 2.

Pro měrné veličiny lze vyjádřit druhý tvar I. zákona termodynamiky v diferenciálním tvaru

$$dq = dh + dw_t. \quad (2.41)$$

Pro měrné veličiny lze vyjádřit druhý tvar I. zákona termodynamiky v integrálním tvaru

$$q_{12} = \Delta h_{12} + w_{t12}. \quad (2.42)$$

kde  $q_{12} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  je měrné teplo přenesené mezi stavem 1 a stavem 2,  $\Delta u_{12} \left[ \frac{J}{kg} \right]$  je změna měrné entalpie mezi stavem 1 a stavem 2 a  $w_{t12}$  je měrná technická práce vykonaná mezi stavem 1 a stavem 2

## 2.6.2 II. zákon termodynamiky, entropie

II. zákon zavádí stavovou veličinu entropii, pro jejíž změnu platí:

pro vratné děje

$$dS = \frac{dQ}{T}, \quad (2.43)$$

resp.

$$ds = \frac{dq}{T}, \quad (2.44)$$

pro nevratné děje

$$dS > \frac{dQ}{T}, \quad (2.45)$$

resp.

$$ds > \frac{dq}{T}. \quad (2.46)$$

Entropie  $S \left[ \frac{J}{K} \right]$  je extenzitní energetickou stavovou veličinou, kterou si lze velmi těžko představit, ale můžeme říci, že vyjadřuje míru neuspořádanosti systému [12].

*Poznámka:*

V našem výpočetním programu budeme uvažovat pouze vratné děje (viz poznámka kapitole 2.2).

Integrováním rovnice (2.43)

$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \frac{dQ}{T}, \quad (2.47)$$

získáme II. zákon termodynamiky v integrálním tvaru

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}, \quad (2.48)$$

resp.

$$\Delta S_{12} = \int_1^2 \frac{dQ}{T}, \quad (2.49)$$

kde  $\Delta S_{12} \left[ \frac{J}{K} \right]$  je změna entropie mezi stavem 1 a stavem 2.

Pro měrné veličiny lze vyjádřit II. zákon termodynamiky

$$\Delta s_{12} = \int_1^2 \frac{dq}{T}, \quad (2.50)$$

kde  $\Delta s_{12} \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$  je změna měrné entropie mezi stavem 1 a stavem 2.

Ze vztahu (2.43) můžeme vyjádřit přenesené teplo mezi stavem 1 a stavem 2

$$dQ = T \cdot dS, \quad (2.51)$$

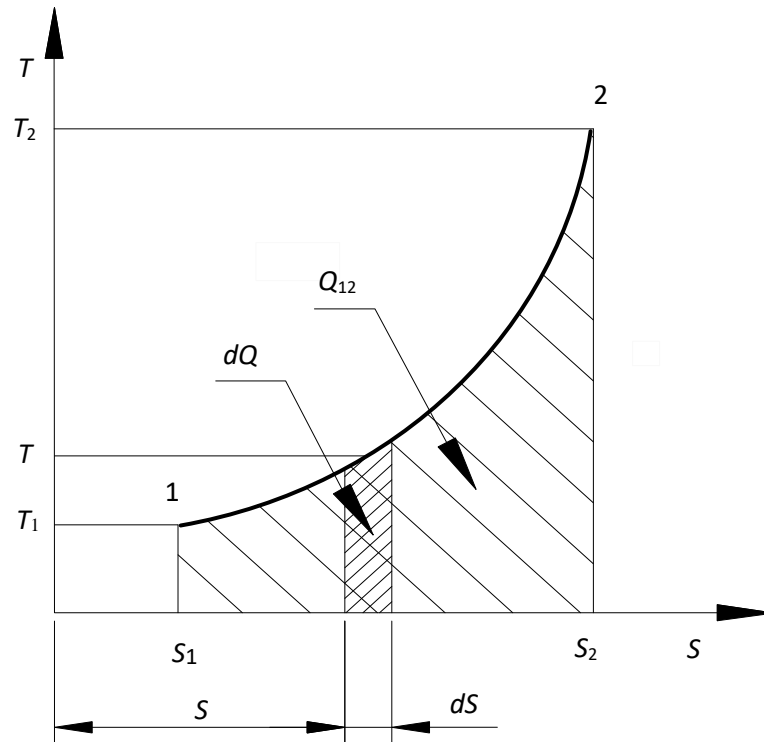
ze kterého po integraci dostaneme

$$Q_{12} = \int_1^2 T \cdot dS. \quad (2.52)$$

Pro měrné veličiny lze vyjádřit přenesené teplo mezi stavem 1 a stavem 2

$$q_{12} = \int_1^2 T \cdot ds. \quad (2.53)$$

Z předchozích vztahů je zřejmé, že dodávání tepla systému bude doprovázeno růstem entropie [12]. Teplo přenesené mezi stavem 1 a stavem 2 můžeme zobrazit v  $T - S$  diagramu (viz obrázek 3), kde na svislou osu vynášíme teplotu  $T$ , na vodorovnou osu entropii  $S$  a přenesené teplo pak můžeme nalézt jako plochu pod křivkou průběhu děje.  $T - S$  diagram se rovněž nazývá tepelným diagramem<sup>4</sup>.



**Obrázek 3:** Tepelný diagram [12]

*Poznámka:*

Veškeré úvahy v této kapitole platí pouze pro vratné děje (viz poznámka v kapitole 2.2).

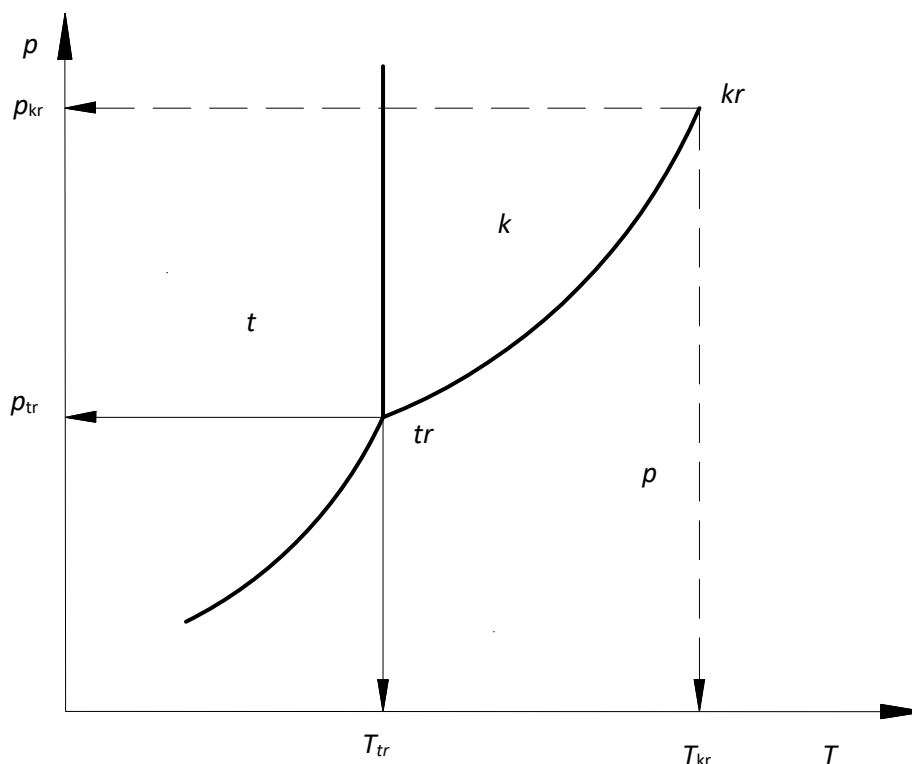
## 2.7 Model ideálního plynu

Ideální plyn je model látky, který má určité idealizované vlastnosti. Je nezbytné si říci, že ve skutečnosti žádný ideální plyn neexistuje, ale za určitých podmínek se některé skutečné plyny mohou svými vlastnostmi blížit jeho vlastnostem. Aby se plyn choval jako ideální plyn, musel by mít nulovou velikost elementárních částic, elementární částice by na sebe vzájemně silově nepůsobily, až na okamžik vzájemného nárazu. Elementární částice by zároveň byly daleko od sebe (zředěný plyn) a model ideálního plynu by byl permanentním plynem [12].

---

<sup>4</sup> V tepelném diagramu můžeme vynášet i měrnou entropii a jako plocha pod křivkou průběhu děje se nám zcela logicky vyobrazí přenesené měrné teplo.

V obrázku 4 je zobrazen schéma fázového diagramu čisté látky, v němž na svislou osu vynášíme tlak  $p$ , na vodorovnou osu teplotu. V diagramu objevují tři skupenství tuhé ( $t$ ), kapalné ( $k$ ) a pro nás především zajímavé plynné ( $p$ ). Tato skupenství jsou oddělena pomocí mezní křivek, na nichž dochází ke změně skupenství. V trojném bodě ( $tr$ ) se vyskytují všechna tři skupenství zároveň. Dalším významným bodem v rovnovážném fázovém diagramu je kritický bod ( $kr$ ), protože nad ním mizí rozdíl mezi kapalným a plynným skupenstvím.



**Obrázek 4:** Rovnovážený fázový diagram čisté látky [12]

Skutečné plyny se chovají jako ideální plyny při nízkých tlacích a vysokých teplotách (zředěné plyny). Rámcově se lze zorientovat v rovnovážném fázovém diagramu pomocí orientačních podmínek pro tlak  $p$  a termodynamickou teplotu  $T$  tyto hodnoty jsou vztaženy ke kritickému bodu a slouží pouze informativně:  $p < 0,05 \cdot p_{kr}$  a  $T < 2 \cdot T_{kr}$  [12].

Model ideálního plynu je definován následujícími vlastnostmi:

1. platí pro něj stavová rovnice ideálního plynu,
2. jeho základní měrné tepelné kapacity jsou konstantní,
3. jeho vnitřní energie a entalpie jsou funkcí pouze teploty [12].

Tyto vlastnosti jsou zcela zásadními pro naše výpočty a budou rozvedeny v následujících podkapitolách.

### 2.7.1 Stavová rovnice ideálního plynu

Stavová rovnice ideálního plynu popisuje závislost mezi základními stavovými veličinami: tlakem, objemem a teplotou. V některé literatuře se setkáváme s názvem termická stavová rovnice ideálního plynu [12]. Stavovou rovnici můžeme napsat ve tvaru ideálního a pro

$m$  kg látky

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T, \quad (2.54)$$

kde  $r \left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$  je měrná plynová konstanta.

Měrnou plynovou konstanta  $r$  je vlastností charakterizující plyn a pro každý plyn má jinou hodnotu [13]. Měrnou plynovou konstantu  $r$  lze vypočítat ze vztahu

$$r = \frac{R}{M}, \quad (2.55)$$

kde  $R = 8314 \frac{J}{kmol \cdot K}$  je univerzální plynová konstanta [13] a  $M \left[ \frac{kg}{kmol} \right]$  je molární hmotnost.

V tab. 1 je uveden přehled prvků, které jsou využity ve výpočetním programu a k nim hodnoty molárních hmotností.

**Tab. 1:** Molární hmotnosti vybraných prvků [14]

| prvek  | chemická značka | molární hmotnost<br>$M \left[ \frac{kg}{kmol} \right]$ |
|--------|-----------------|--|
| vzduch | -               | 28,9641  |
| vodík  | H               | 1,00797  |
| helium | He              | 4,00260  |
| uhlík  | C               | 12,01115   |
| dusík  | N               | 14,00670   |
| kyslík | O               | 15,99940   |
| neon   | Ne              | 20,18300   |

*Poznámka:*

Pro vzduch je měrná plynová konstanta ve výpočetním programu  $r = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$ .

Stavovou rovnici ideálního plynu využíváme i v jiných tvarech. Když vydělíme rovnici (2.54) hmotností  $m$ , získáme stavovou rovnici ideálního plynu pro 1 kg látky

$$p \cdot v = r \cdot T. \quad (2.56)$$

Dosazením do rovnice (2.56) ze vztahu pro hustotu (224) získáme jiný tvar stavové rovnice ideálního plynu pro 1 kg látky

$$p = \rho \cdot r \cdot T. \quad (2.57)$$

### 2.7.2 Základní měrné tepelné kapacity, Poissonova konstanta

Mezi základní měrné tepelné kapacity patří izochorická měrná tepelná kapacita  $c_v$  a izobarická měrná tepelná kapacita  $c_p$ .

Izochorická měrná tepelná kapacita  $c_v$  je definována vztahem

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v, \quad (2.58)$$

Izobarická měrná tepelná kapacita  $c_p$  je definována vztahem

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p. \quad (2.59)$$

Při výpočtu základních měrných tepelných kapacit vycházíme ze dvou základních rovnic, konkrétně Mayerovy rovnice

$$c_p - c_v = r \quad (2.60)$$

a rovnice pro podíl základních měrných kapacit, která je rovna Poissonově konstantě  $\kappa$  [1]

$$\frac{c_p}{c_v} = \kappa. \quad (2.61)$$

Vyřešením soustavy rovnic (2.60) a (2.61) získáme výpočtový vztah pro izochorickou měrnou tepelnou kapacitu  $c_v$   $\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$

$$c_v = \frac{r}{\kappa - 1} \quad (2.62)$$

a izobarickou měrnou tepelnou kapacitu  $c_p$   $\left[ \frac{J}{kg \cdot K} \right]$

$$c_p = \frac{r \cdot \kappa}{\kappa - 1}. \quad (2.63)$$

Hodnota Poissonovy konstanty  $\kappa$  (viz tab. 2.) je dána počtem atomů v molekule plynu.

**Tab. 2:** Hodnoty Poissonovy konstanty [14]

| plyn                      | $\kappa$ [ 1 ] |
|---------------------------|----------------|
| jednoatomový              | 1,66           |
| dvouatomový               | 1,4            |
| tříatomový a více atomový | 1,33           |

### 2.7.3 Vnitřní energie a entalpie ideálního plynu

Pro model ideálního plynu platí, že vnitřní energii je závislá pouze na teplotě  $u = u(T)$ , a proto  $\left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$ . Termodynamická stavová rovnice pro změnu vnitřní energie (2.24) proto zní

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \cdot dT. \quad (2.64)$$

Dosazením izochorické měrné tepelné kapacity  $c_v$  (2.58) získáme diferenciální vztah pro výpočet změny měrné vnitřní energie

$$du = c_v \cdot dT. \quad (2.65)$$

Integrováním předchozího vztahu

$$\int_1^2 du = \int_1^2 c_v \cdot dT, \quad (2.66)$$



získáme změnu měrné vnitřní energie mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2

$$\Delta u_{12} = c_v \cdot (T_2 - T_1). \quad (2.67)$$

Pro změnu celkové vnitřní energie mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2 tato rovnice zní

$$\Delta U_{12} = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1). \quad (2.68)$$

Pro model ideálního plynu platí, že entalpie je závislá pouze na teplotě  $h = h(T)$ , a proto  $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = 0$ . Termodynamická stavová rovnice pro změnu entalpie (2.28) proto zní

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \cdot dT. \quad (2.69)$$

Dosazením izobarické měrné tepelné kapacity  $c_p$  (2.59) získáme diferenciální vztah pro výpočet změny měrné entalpie

$$dh = c_p \cdot dT. \quad (2.70)$$

Integrováním předchozího vztahu

$$\int_1^2 dh = \int_1^2 c_p \cdot dT, \quad (2.71)$$

získáme změnu měrné entalpie mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2

$$\Delta h_{12} = c_p \cdot (T_2 - T_1). \quad (2.72)$$

Pro změnu celkové entalpie mezi počátečním stavem 1 a konečným stavem 2 tato rovnice zní

$$\Delta H_{12} = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1). \quad (2.73)$$

## 2.8 Základní vratné změny stavu v ideálním plynu

V předchozích kapitolách byly sepsány veškeré potřebné zákony, definice, rovnice a konstanty, které uplatníme při výpočtu základních vratných změn stavu v ideálním plynu. Základní vratné změny stavu rozdělujeme podle toho, která z termodynamických veličin má konstantní hodnotu:

1. izochorická změna - konstantní objem,
2. izobarická změna - konstantní tlak,
3. izotermická změna - konstantní teplota,
4. izoentropická (adiabatická) - konstantní entropie.

Ve výpočetním programu budeme počítat základní stavové veličiny v počátečním a konečném stavu (tlak, teplotu a objem), změny energetických stavových veličiny (vnitřní energie, entalpie a entropie), procesní veličiny (objemovou práci, technickou práci a teplo).

### 2.8.1 Izochorická vratná změna stavu ideálního plynu

Při izochorické změně stavu nedochází ke změně objemu systému, a tudíž platí, že

$$dv = 0, \quad (2.74)$$

neboli měrný objem  $v_1$  ve stavu 1 se rovná měrnému objemu  $v_2$  ve stavu 2, a proto měrný objem  $v$  bude konstantní

$$v_1 = v_2 = v = konst. \quad (2.75)$$

V počátečním stavu 1 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$p_1 \cdot v = r \cdot T_1, \quad (2.76)$$

v konečném stavu 2 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$p_2 \cdot v = r \cdot T_2. \quad (2.77)$$

podílem rovnic (2.76) a (2.77) získáme

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2.78)$$

Dosazením z rovnice (2.74) do rovnice (2.11) zjistíme, že během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu se nekoná objemová práce

$$w_{12} = \int_1^2 p \cdot dv = 0, \quad (2.79)$$

resp.

$$W_{12} = 0. \quad (2.80)$$

Měrnou technickou práci vykonanou mezi stavem 1 a stavem 2 během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu vypočítáme ze vztahu (2.21)

$$\begin{aligned} w_{t_{12}} &= \int_1^2 -v \cdot dp = -v \cdot \int_1^2 dp = \\ &= -v \cdot (p_2 - p_1). \end{aligned} \quad (2.81)$$

Vztah pro výpočet celkové technické práce vykonané mezi stavem 1 a stavem 2 během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu zní

$$W_{t_{12}} = -V \cdot (p_2 - p_1). \quad (2.82)$$

Dosazením rovnice (2.79) do I. zákona termodynamiky (2.33) dostaneme vztah pro výpočet měrného tepla přeneseného mezi 1 a stavem 2

$$q_{12} = \Delta u_{12}, \quad (2.83)$$

kde změnu měrné vnitřní energie  $\Delta u_{12}$  během izochorické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze vypočítat z rovnice (2.67).

Vztah pro výpočet celkového tepla přeneseného během izochorické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 zní

$$Q_{12} = \Delta U_{12}, \quad (2.84)$$

kde změnu vnitřní energie  $\Delta U_{12}$  během izochorické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze vypočítat z rovnice (2.68).

Změnu entalpie  $\Delta h_{12}$  během izochorické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2

lze vypočítat pomocí rovnice (2.72).

Změnu entalpie  $\Delta H_{12}$  během izochorické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze vypočítat pomocí rovnice (2.73).

Dosazením I. zákona termodynamiky v prvním tvaru (2.32) do II. zákona termodynamiky ve znění pro vratné děje (2.50)

$$\begin{aligned}\Delta S_{12} &= \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{du + dw}{T} = \\ &= \int_1^2 \frac{du}{T} + \int_1^2 \frac{dw}{T},\end{aligned}\quad (2.85)$$

kde z rovnice (2.79) pro měrnou objemovou práci během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu  $dw = 0$  a dosazením rovnice pro vnitřní energii (2.65) dostaneme

$$\Delta S_{12} = \int_1^2 \frac{du}{T} = \int_1^2 \frac{c_v \cdot dT}{T} = c_v \cdot \int_1^2 \frac{dT}{T}. \quad (2.86)$$

Po integraci a dosazení mezí získáme změnu měrné entropie při izochorické vratné změně ideálního plynu mezi stavem 1 a stavem 2

$$\Delta S_{12} = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right). \quad (2.87)$$

Vztah pro výpočet změny celkové entropie při izochorické vratné změně stavu ideálního plynu mezi stavem 1 a stavem 2 zní

$$\Delta S_{12} = m \cdot c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right). \quad (2.88)$$

### 2.8.2 Izobarická vratná změna stavu ideálního plynu

Při izobarické změně stavu nedochází ke změně tlaku systému, a tudíž platí, že

$$dp = 0, \quad (2.89)$$

neboli tlak  $p_1$  ve stavu 1 se rovná tlaku  $p_2$  ve stavu 2, a proto tlak  $p$  budeme za konstantní

$$p_1 = p_2 = p = konst. \quad (2.90)$$

V počátečním stavu 1 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$v_1 \cdot p = r \cdot T_1, \quad (2.91)$$

v konečném stavu 2 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$v_2 \cdot p = r \cdot T_2. \quad (2.92)$$

podílem rovnic (2.91) a (2.92) dostaneme

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (2.93)$$

Dosazením vztahu (2.89) do rovnice (2.21) zjistíme, že během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu se nekoná technická práce.

$$w_{t_{12}} = \int_1^2 -v \cdot dp = 0, \quad (2.94)$$

resp.

$$W_{t_{12}} = 0. \quad (2.95)$$

Objemovou práci vykonanou mezi stavem 1 a stavem 2 během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu vypočítáme ze vztahu (2.11)

$$\begin{aligned} w_{12} &= \int_1^2 p \cdot dv = p \cdot \int_1^2 dv = \\ &= p \cdot (v_2 - v_1). \end{aligned} \quad (2.96)$$

Vztah pro výpočet celkové objemové práce vykonané mezi stavem 1 a stavem 2 během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu zní

$$W_{12} = p \cdot (V_2 - V_1). \quad (2.97)$$

Dosazením vztahu (2.79) pro výpočet změny objemové práce mezi stavem 1 a stavem 2 během izobarické vratné změny stavu do I. zákona termodynamiky (2.42) dostaneme následující vztah

$$q_{12} = \Delta h_{12}, \quad (2.98)$$

kde změnu entalpie  $\Delta H_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 během izobarické vratné změny stavu lze vypočítat z rovnice (2.72).

Vztah pro výpočet celkového tepla přeneseného během izobarické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 zní

$$Q_{12} = \Delta H_{12}, \quad (2.99)$$

kde změnu entalpie  $\Delta H_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 během izobarické vratné změny stavu lze vypočítat z rovnice (2.73).

Změnu vnitřní energie  $\Delta u_{12}$  během izobarické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze vypočítat z rovnice (2.67).

Změnu vnitřní energie  $\Delta U_{12}$  během izobarické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze vypočítat z rovnice (2.68).

Dosazením druhého tvaru I. zákona termodynamiky (2.41) do II. zákona termodynamiky (2.50)

$$\begin{aligned} \Delta s_{12} &= \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_1^2 \frac{dh + dw_t}{T} = \\ &= \int_1^2 \frac{dh}{T} + \int_1^2 \frac{dw_t}{T} =, \end{aligned} \quad (2.100)$$

kde ze vztahu (2.94) pro technickou práci je zřejmé, že  $dw_t = 0$  a dosazením vztahu (2.70) pro entalpii i dostaneme

$$= \int_1^2 \frac{dh}{T} = \int_1^2 \frac{c_p \cdot dT}{T} = c_p \cdot \int_1^2 \frac{dT}{T}.$$

Po integraci a dosazení mezi získáme změnu měrné entropie při izobarické vratné změně ideálního plynu mezi stavem 1 a stavem 2

$$\Delta s_{12} = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right). \quad (2.101)$$

Vztah pro výpočet změny celkové entropie při izobarické vratné změně stavu ideálního plynu mezi stavem 1 a stavem 2 zní

$$\Delta S_{12} = m \cdot c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right). \quad (2.102)$$

### 2.8.3 Izotermická vratná změna stavu ideálního plynu

Při izotermické změně stavu nedochází ke změně teploty systému, a tudíž platí, že

$$dT = 0, \quad (2.103)$$

neboli teplota  $T_1$  ve stavu 1 se rovná teplotě  $T_2$  ve stavu 2, a proto teplota  $T$  bude konstantní

$$T_1 = T_2 = T = konst. \quad (2.104)$$

V počátečním stavu 1 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$p_1 \cdot v_1 = r \cdot T, \quad (2.105)$$

v konečném stavu 2 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$p_2 \cdot v_2 = r \cdot T. \quad (2.106)$$

Podílem rovnic (2.105) a (2.106) dostáváme

$$v_1 \cdot p_1 = v_2 \cdot p_2. \quad (2.107)$$

Po dosazení z rovnice (2.104) do rovnice (2.67) pro změnu vnitřní energie  $\Delta u_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny získáme

$$\Delta u_{12} = 0. \quad (2.108)$$

Po dosazení z rovnice (2.104) do rovnice (2.72) pro změnu entalpie  $\Delta h_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny získáme

$$\Delta h_{12} = 0. \quad (2.109)$$

Objemovou práci vykonanou mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu vypočítáme ze vztahu (2.9)

$$w_{12} = \int_1^2 p \cdot dv = \int_1^2 p(v) \cdot dv, \quad (2.110)$$

do kterého následně dosadíme po vyjádření  $p(V)$  ze stavové ideálního plynu (2.56)

$$w_{12} = \int_1^2 \frac{r \cdot T}{v} \cdot dv, \quad (2.111)$$

jelikož z rovnice (2.104) víme, že teplota bude mít konstantní hodnotu, můžeme ji společně

s ostatními konstantami vytknout před integrál

$$w_{12} = r \cdot T \cdot \int_1^2 \frac{1}{v} \cdot dv, \quad (2.112)$$

a po integraci získáme vztah pro výpočet měrné objemové práce vykonané mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu

$$w_{12} = r \cdot T \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right). \quad (2.113)$$

Vztah pro výpočet celkové objemové práce vykonané mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu zní

$$W_{12} = m \cdot r \cdot T \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right). \quad (2.114)$$

Technickou práci vykonanou mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu vypočítáme ze vztahu (2.21)

$$w_{t_{12}} = \int_1^2 -v \cdot dp = \int_1^2 -v(p) \cdot dp \quad (2.115)$$

do kterého následně dosadíme po vyjádření  $V(p)$  ze stavové ideálního plynu (2.56)

$$w_{t_{12}} = \int_1^2 \frac{r \cdot T}{p} \cdot dp, \quad (2.116)$$

jelikož z rovnice (2.104) víme, že teplota bude mít konstantní hodnotu, můžeme ji společně s ostatními konstantami vytknout před integrál

$$w_{t_{12}} = r \cdot T \cdot \int_1^2 \frac{1}{p} \cdot dp, \quad (2.117)$$

a po integraci získáme

$$w_{t_{12}} = r \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \quad (2.118)$$

Vztah pro výpočet celkové technické práce vykonané mezi stavem 1 a stavem 2 během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu zní

$$W_{t_{12}} = m \cdot r \cdot T \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \quad (2.119)$$

Po dosazení z rovnice (2.108) do I. zákona termodynamiky v prvním tvaru (2.33)

$$q_{12} = w_{12}. \quad (2.120)$$

Podobně po dosazení z rovnice (2.109) do I. zákona termodynamiky ve druhém tvaru (2.42)

$$q_{12} = w_{t_{12}}. \quad (2.121)$$

Z rovnice (2.120) a (2.121) vyplývá, že

$$q_{12} = w_{12} = w_{t_{12}}, \quad (2.122)$$

resp.

$$Q_{12} = W_{12} = W_{t_{12}}. \quad (2.123)$$

Ze II. zákona termodynamiky (2.50)

$$\Delta s_{12} = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \frac{1}{T} \cdot \int_1^2 dq, \quad (2.124)$$

po integraci získáme vztah pro změnu entropie při izotermické vratné změně ideálního plynu mezi stavem 1 a stavem 2

$$\Delta s_{12} = \frac{q_{12}}{T}. \quad (2.125)$$

Vztah pro výpočet změny celkové entropie při izotermické vratné změně stavu ideálního plynu mezi stavem 1 a stavem 2 zní

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_{12}}{T}. \quad (2.126)$$

#### 2.8.4 Izoentropická (vratná adiabatická) změna stavu ideálního plynu

Při izoentropické změně stavu nedochází ke změně entropie systému, a tudíž platí, že

$$ds = 0, \quad (2.127)$$

v integrálním tvaru

$$\Delta s_{12} = \int_1^2 ds = 0. \quad (2.128)$$

Entropie  $s_1$  ve stavu 1 se rovná entropii  $s_2$  ve stavu 2, a proto teplota  $s$  bude konstantní

$$s_1 = s_2 = s = konst. \quad (2.129)$$

V počátečním stavu 1 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$p_1 \cdot v_1 = r \cdot T_1, \quad (2.130)$$

v konečném stavu 2 bude mít rovnice (2.56) pro 1 kg látky tvar

$$p_2 \cdot v_2 = r \cdot T_2. \quad (2.131)$$

Dosazením rovnice (2.127) do rovnice (2.53) získáme

$$q_{12} = 0. \quad (2.132)$$

Během izoentropické změny stavu ideálního plynu se mezi stavem 1 a 2 nepřenáší teplo, a proto je tato změna stavu rovněž i vratnou adiabatickou změnou stavu ideálního plynu.

Dosazením předchozího vztahu do I. zákona termodynamiky v prvním tvaru dostaneme

$$\Delta w_{12} = -\Delta u_{12}, \quad (2.133)$$

kde změnu měrné vnitřní energie  $\Delta u_{12}$  během izoentropické změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze vypočítat z rovnice (2.67).

Vztah pro výpočet celkové technické práce vykonané mezi stavem 1 a stavem 2 během izoentropické vratné změny stavu ideálního plynu zní

$$\Delta W_{12} = -\Delta U_{12}, \quad (2.134)$$

kde změnu vnitřní energie  $\Delta U_{12}$  během izoentropické změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 lze

vypočítat z rovnice (2.68).

Zderivováním předchozí rovnice (2.133)

$$dw = -du \quad (2.135)$$

a dosazením rovnice (2.65) získáme

$$dw = -c_v \cdot dT \quad (2.136)$$

Dosazením z rovnice (2.132) do I. zákona termodynamiky ve druhém tvaru dostaneme

$$\Delta w_{t12} = -\Delta h_{12}, \quad (2.137)$$

kde změnu měrné entalpie  $\Delta h_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 během izoentropické změny stavu lze vypočítat z rovnice (2.72).

Vztah pro výpočet celkové technické práce vykonané během izoentropické vratné změny stavu mezi stavem 1 a stavem 2 zní

$$\Delta W_{t12} = -\Delta H_{12}, \quad (2.138)$$

kde změnu entalpie  $\Delta H_{12}$  mezi stavem 1 a stavem 2 během izoentropické změny stavu lze vypočítat z rovnice (2.73).

Zderivováním předchozí rovnice a dosazením z rovnic (2.70) a (2.61) dostaneme

$$dw_t = -dh = -c_p \cdot dT = -\kappa \cdot c_v \cdot dT. \quad (2.139)$$

Dosazením z rovnice (2.135) dostaneme

$$dw_t = \kappa \cdot dw, \quad (2.140)$$

následně dosadíme z rovnice (2.20) a rovnice (2.10)

$$\kappa \cdot p \cdot dv + v \cdot dp = 0, \quad (2.141)$$

$$d(p \cdot v^\kappa) = 0. \quad (2.142)$$

Po integraci předchozího vztahu získáme

$$p \cdot v^\kappa = konst. \quad (2.143)$$

resp.

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right)^\kappa = \left(\frac{p_1}{p_2}\right). \quad (2.144)$$

Můžeme také vyjádřit závislost tlaku na teplotě. Dosazením rovnice (2.127) do II. zákona termodynamiky (2.44) dostaneme

$$0 = \frac{dq}{T}. \quad (2.145)$$

Po dosazení I. zákona termodynamiky ve druhém tvaru (2.41) dostaneme

$$0 = \frac{dh}{T} + \frac{dw_t}{T}. \quad (2.146)$$

Dosazením z rovnice (2.70) a (2.17)



$$0 = \frac{c_p \cdot dT}{T} - \frac{v \cdot dp}{T}. \quad (2.147)$$

Po dosazení stavové rovnice ideálního plynu (2.56) dostaneme

$$0 = \frac{c_p \cdot dT}{T} - \frac{r \cdot dp}{p}. \quad (2.148)$$

Integrovaním

$$c_p \cdot \int_1^2 \frac{dT}{T} = r \cdot \int_1^2 \frac{dp}{p} \quad (2.149)$$

a dosazením z rovnice (2.63)

$$\frac{r \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot \int_1^2 \frac{dT}{T} = r \cdot \int_1^2 \frac{dp}{p}, \quad (2.150)$$

získáme

$$\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right). \quad (2.151)$$

Po odlogaritmováním předchozí rovnice získáme vztah mezi teplotou a tlakem během izoentropické změny stavu ideálního plynu

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right). \quad (2.152)$$

Z rovnice (2.144) a (2.152) vyplývá, že

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.153)$$

### **3 Volba programu Microsoft Visual Studio a programovacího jazyku C#**

Během studia na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci se studenti setkají se dvěma programovacími jazyky. V průběhu studia prvního ročníku se programuje v předmětu Programování I, ve druhém ročníku pak v předmětu Matematika 3 a v posledním ročníku v předmětu Aplikovaná kybernetika. Všechny zmíněné předměty dají studentům základní znalosti v oblasti programování, ale ani jeden z překladačů a programovacích jazyků nebyl z několika důvodů vhodný pro tuto práci.

V předmětu Programování I byl vyučován překladač Free Pascal a programovací jazyk Pascal. Při cvičeních z Matematiky 3 se vyučuje program MATLAB a stejnojmenný programovací jazyk MATLAB, na který se navazuje v předmětu Aplikovaná kybernetika. Programovací jazyk Pascal vznikl již v roce 1970 a jeho prostředí je značně nedostatečné pro dnešní požadavky uživatele. Nad použitím programu MATLAB bylo určitou dobu uvažováno, ale protože na výstupu může být soubor (.exe) veliký i v řádu stovek MB bylo nakonec od této myšlenky ustoupeno.

Bylo nezbytné najít optimální variantu mezi dosaženými programovacími znalostmi a kvalitním zpracováním výsledného programu. Proto bylo zvoleno Microsoft Visual Studio, jehož výhodou je, že nabízí celkem široké spektrum možností programování a programovacích jazyků. Jako optimální varianta byl zvolen programovací jazyk C#, ve kterém byla nalezena dostatečná podobnost s jazykem Pascal a mohly být využity již nabyté znalosti. Microsoft Visual Studio nabízí pro jazyk C# programování konzolové aplikace nebo pro operační systém Windows programování prostřednictvím Windows Forms, a právě Windows Forms byl jedním z požadavků, který byl předem určen.

## 4 Algoritmy výpočtu

### 4.1 Určení vlastností plynu

Pro výpočet budeme potřebovat nastavit vlastnosti plynu: měrnou plynovou konstantu  $r$ , izochorickou měrnou tepelnou kapacitu  $c_v$ , izobarickou měrnou tepelnou kapacitu  $c_p$ , molární hmotnost  $M$  a Poissonovu konstantu  $\kappa$ .

Uživatel určí tyto vlastnosti buď pomocí volby plynu ze seznamu, který je v programu předem nadefinován, anebo právě dvě z nich zadá a program zbývající dopočítá.

#### 4.1.1 Volba ze seznamu

Plyny v seznamu (tab. 3) byly zvoleny na základě toho, jaké plyny se vyskytují během výpočtů na cvičeních a přednáškách z předmětu Termodynamika a sdílení tepla.

**Tab. 3:** Přehled plynů pro volbu látky ze seznamu

| plyn   | chemická značka | plyn          | chemická značka                |
|--------|-----------------|---------------|--------------------------------|
| vzduch | -               | oxid uhličitý | CO <sub>2</sub>                |
| helium | He              | methan        | CH <sub>4</sub>                |
| neon   | Ne              | ethan         | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  |
| vodík  | H               | propan        | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  |
| dusík  | N               | butan         | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> |
| kyslík | O <sub>2</sub>  | amoniak       | NH <sub>3</sub>                |
| ozón   | O <sub>3</sub>  | oxid uhličitý | CO <sub>2</sub>                |

Pro jednotlivé plyny z tab. 3 je molární hmotnost  $M$  plynu určena pomocí tab. 1, měrná plynová konstanta  $r$  vypočítána pomocí rovnice (2.55), Poissonova konstanta  $\kappa$  je určena pomocí tab. 2, izobarická měrná tepelná kapacita  $c_p$  vypočítána pomocí rovnice (2.63) a izochorická měrná tepelná kapacita  $c_v$  vypočítána pomocí rovnice (2.62).

#### 4.1.2 Manuální zadání

Manuální volba zadání eliminuje omezení uživatele určit vlastnosti plynu pouze pro látky zvolené ze seznamu (tab. 3) a dává uživateli možnost výpočtu vlastností libovolného plynu na základě určité kombinace vstupních parametrů. Pro jednoznačné zadání musí být dány právě dva vstupní parametry (vlastnosti plynu).

**Tab. 4:** Přehled algoritmů pro určení vlastností látky při manuálním zadání

| číslo komb. | vstupní parametry | výstupní parametry |
|-------------|-------------------|--------------------|
| 1           | $M, \kappa$       | $c_p, c_v, r$      |
| 2           | $c_p, c_v$        | $r, \kappa, M$     |
| 3           | $c_p, r$          | $c_v, M, \kappa$   |
| 4           | $r, \kappa$       | $c_p, c_v, M$      |

- 1) Algoritmus pro zadané parametry:  $M, \kappa$ . Výstupní parametry jsou vypočítány následovně:  $c_p$  pomocí rovnice (2.63),  $c_v$  pomocí rovnice (2.62),  $r$  pomocí rovnice (2.60).
- 2) Algoritmus pro zadané parametry:  $c_p, c_v$ . Výstupní parametry jsou vypočítány následovně:  $r$  pomocí rovnice (2.60),  $\kappa$  pomocí rovnice (2.61).  
Vyjádřením z rovnice (2.55) získáme molární hmotnost  $M$

$$M = \frac{R}{r}. \quad (4.1)$$

- 3) Algoritmus pro zadané parametry:  $c_p, r$ . Výstupní parametry jsou vypočítány následovně:  $c_v$  pomocí rovnice (2.62),  $M$  pomocí rovnice (4.1),  $\kappa$  pomocí rovnice (2.61).
- 4) Algoritmus pro zadané parametry:  $r, \kappa$ . Výstupní parametry jsou vypočítány následovně:  $c_p$  pomocí rovnice (2.63),  $c_v$  pomocí rovnice (2.62),  $M$  pomocí rovnice (4.1).

## 4.2 Algoritmy pro výpočet základních stavových veličin ideálního plynu

Uživatel určí stav látky pomocí základních stavových veličin a program vypočítá zbylé základní stavové veličiny. Pro dodržení jednoznačného zadání musí být stav látky určen právě dvěma základními stavovými veličinami.

V případě je-li stav látky zadán pomocí celkového objemu  $V$  a hmotnosti  $m$  převeden na měrný objem  $v$ . Je-li stav látky zadán pomocí hustoty  $\rho$  je obdobně převeden na měrný objem  $v$ . Při zadání stavu látky pomocí celkového objemu  $V$  a hmotnosti  $m$  slouží k převodu na měrný objem  $v$  rovnice (2.3) a při zadání pomocí hustoty  $\rho$  slouží k převodu na měrný objem  $v$  rovnice (2.4). K podobné situaci dochází, je-li stav látky zadán pomocí teploty  $t$ , která bude pomocí rovnice (2.2) převedena na termodynamickou teplotu  $T$ .

Převod na měrný objem  $v$  a termodynamickou teplotu  $T$  je nezbytný, protože se tyto veličiny vyskytují v dalších algoritmech programu.

### 4.2.1 Izochorická vratná změna stavu ideálního plynu ( $v_1 = v_2 = v = konst.$ )

Na základě přechozích úvah jsou v tab. 5 uvedeny kombinace vstupních a výstupních veličin během izochorické vratné změny stavu.

**Tab. 5:** Přehled kombinací vstupních a výstupních veličin během izochorické vratné změny stavu

| číslo komb. | vstupní veličiny | výstupní veličiny | č. k. | vstupní veličiny | výstupní veličiny |
|-------------|------------------|-------------------|-------|------------------|-------------------|
| 1           | $p_1, T_1, T_2$  | $p_2, v$          | 5     | $T_1, T_2, p_2$  | $p_1, v$          |
| 2           | $p_1, p_2, T_1$  | $T_2, v$          | 6     | $p_1, p_2, v$    | $T_1, T_2$        |
| 3           | $p_1, p_2, T_2$  | $T_1, v$          | 7     | $T_2, v, p_1$    | $T_1, p_2$        |
| 4           | $T_1, T_2, v$    | $p_1, p_2$        | 8     | $T_1, v, p_2$    | $p_1, T_2$        |

Základní stavové veličiny jsou pro jednotlivé algoritmy vypočítány z rovnic (2.76), (2.77), (2.78).

- 1) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, T_1, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_2 = \frac{p_2}{T_1} \cdot T_2, v = \frac{T_1}{p_1} \cdot r. \quad (4.2)$$

- 2) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, T_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} \cdot T_1, v = \frac{T_1}{p_1} \cdot r. \quad (4.3)$$

- 3) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \frac{p_1}{p_2} \cdot T_2, v = \frac{T_2}{p_2} \cdot r. \quad (4.4)$$

- 4) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, v$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_1 = \frac{T_1}{v} \cdot r, p_2 = \frac{T_2}{v} \cdot r. \quad (4.5)$$

- 5) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, p_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_1 = \frac{p_2}{T_2} \cdot T_1, v = \frac{T_2}{p_2} \cdot r. \quad (4.6)$$

- 6) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, v$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \frac{p_1}{r} \cdot v, T_2 = \frac{p_2}{r} \cdot v. \quad (4.7)$$

- 7) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_2, v, p_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \frac{p_1}{r} \cdot v, p_2 = \frac{T_2}{T_1} \cdot p_1. \quad (4.8)$$

- 8) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, v, p_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_2 = \frac{p_2}{r} \cdot v, p_1 = \frac{T_1}{T_2} \cdot p_2. \quad (4.9)$$

#### 4.2.2 Izobarická vratná změna stavu ideálního plynu ( $p_1 = p_2 = p = konst.$ )

Na základě úvah v kapitole 4.2 jsou v tab. 6 uvedeny kombinace vstupních a výstupních veličin během izobarické vratné změny stavu.

**Tab. 6:** Přehled kombinací vstupních a výstupních veličin během izobarické vratné změny stavu.

| číslo komb. | vstupní veličiny | výstupní veličiny | č. k. | vstupní veličiny | výstupní veličiny |
|-------------|------------------|-------------------|-------|------------------|-------------------|
| 1           | $v_1, v_2, T_1$  | $T_2, p$          | 5     | $v_1, v_2, p$    | $T_1, T_2$        |
| 2           | $v_1, v_2, T_2$  | $T_1, p$          | 6     | $T_1, T_2, p$    | $v_1, v_2$        |
| 3           | $T_1, T_2, v_1$  | $v_2, p$          | 7     | $T_1, v_2, p$    | $v_1, T_2$        |
| 4           | $T_1, T_2, v_2$  | $v_1, p$          | 8     | $T_2, v_1, p$    | $v_2, T_1$        |

Základní stavové veličiny jsou pro jednotlivé algoritmy vypočítány z rovnic (2.91), (2.92), (2.93).

- 1) Algoritmus pro zadané veličiny:  $v_1, v_2, T_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_2 = \frac{v_2}{v_1} \cdot T_1, p = \frac{T_1}{v_1} \cdot r. \quad (4.10)$$

- 2) Algoritmus pro zadané veličiny:  $v_1, v_2, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \frac{v_1}{v_2} \cdot T_2, p = \frac{T_2}{v_2} \cdot r. \quad (4.11)$$

- 3) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, v_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_2 = \frac{T_2}{T_1} \cdot v_1, p = \frac{T_1}{v_1} \cdot r. \quad (4.12)$$

- 4) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, v_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \frac{T_1}{T_2} \cdot v_2, p = \frac{T_2}{v_2} \cdot r. \quad (4.13)$$

- 5) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p, v_2, p$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \frac{v_1}{r} \cdot p, T_2 = \frac{v_2}{r} \cdot p. \quad (4.14)$$

- 6) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, p$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \frac{T_1}{p} \cdot r, v_2 = \frac{T_2}{p} \cdot r. \quad (4.15)$$

- 7) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, p, v_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \frac{T_1}{p} \cdot r, T_2 = \frac{v_2}{v_1} \cdot T_1. \quad (4.16)$$

- 8) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p, v_1, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_2 = \frac{T_2}{p} \cdot r, T_1 = \frac{v_1}{v_2} \cdot T_2. \quad (4.17)$$

#### 4.2.3 Izotermická vratná změna stavu ideálního plynu ( $T_1 = T_2 = T = konst.$ )

Na základě úvah v kapitole 4.2 jsou v tab. 7 uvedeny kombinace vstupních a výstupních

veličin během izotermické vratné změny stavu.

**Tab. 7:** Přehled kombinací vstupních a výstupních veličin během izotermické vratné změny stavu.

| číslo komb. | vstupní veličiny | výstupní veličiny | č. k. | vstupní veličiny | výstupní veličiny |
|-------------|------------------|-------------------|-------|------------------|-------------------|
| 1           | $v_1, v_2, p_1$  | $p_2, T$          | 5     | $p_1, p_2, T$    | $v_1, v_2$        |
| 2           | $v_1, v_2, p_2$  | $p_1, T$          | 6     | $v_1, v_2, T$    | $p_1, p_2$        |
| 3           | $p_1, p_2, v_1$  | $v_2, T$          | 7     | $p_1, v_2, T$    | $v_1, p_2$        |
| 4           | $p_1, p_2, v_2$  | $v_1, T$          | 8     | $p_2, v_1, T$    | $v_2, p_1$        |

Základní stavové veličiny jsou pro jednotlivé algoritmy vypočítány z rovnic (2.105), (2.106), (2.107).

- 1) Algoritmus pro zadané veličiny -  $v_1, v_2, p_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_2 = \frac{v_1}{v_2} \cdot p_1, T = \frac{v_1}{r} \cdot p_1. \quad (4.18)$$

- 2) Algoritmus pro zadané veličiny -  $v_1, v_2, p_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_1 = \frac{v_2}{v_1} \cdot p_2, T = \frac{v_2}{r} \cdot p_2. \quad (4.19)$$

- 3) Algoritmus pro zadané veličiny -  $p_1, p_2, v_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot v_1, T = \frac{v_1}{r} \cdot p_1. \quad (4.20)$$

- 4) Algoritmus pro zadané veličiny -  $p_1, p_2, v_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \frac{p_2}{p_1} \cdot v_2, T = \frac{v_2}{r} \cdot p_2. \quad (4.21)$$

- 5) Algoritmus pro zadané veličiny -  $p_1, p_2, T$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \frac{T}{p_1} \cdot r, v_2 = \frac{T}{p_2} \cdot r. \quad (4.22)$$

- 6) Algoritmus pro zadané veličiny -  $v_1, v_2, T$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_1 = \frac{T}{v_1} \cdot r, p_2 = \frac{T}{v_2} \cdot r. \quad (4.23)$$

- 7) Algoritmus pro zadané veličiny -  $p_1, v_2, T$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \frac{T}{p_1} \cdot r, p_2 = \frac{T}{v_2} \cdot r. \quad (4.24)$$

- 8) Algoritmus pro zadané veličiny -  $v_1, p_2, T$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_2 = \frac{T}{p_2} \cdot r, p_1 = \frac{T}{v_1} \cdot r. \quad (4.25)$$

#### 4.2.4 Izoentropická (vratná adiabatická) změna stavu ideálního plynu ( $s_1 = s_2 = s = konst.$ )

Na základě úvah v kapitole 4.2 jsou v tab. 8 uvedeny kombinace vstupních a výstupních veličin během izochorické vratné změny stavu.

**Tab. 8:** Přehled kombinací vstupních a výstupních veličin během izoentropické změny stavu.

| číslo komb. | vstupní veličiny | výstupní veličiny | č. k. | vstupní veličiny | výstupní veličiny |
|-------------|------------------|-------------------|-------|------------------|-------------------|
| 1           | $p_1, p_2, T_1$  | $T_2, v_1, v_2$   | 7     | $p_1, T_1, T_2$  | $p_1, v_1, v_2$   |
| 2           | $p_1, p_2, T_2$  | $T_1, v_1, v_2$   | 8     | $p_2, T_1, T_2$  | $p_2, v_1, v_2$   |
| 3           | $v_1, v_2, T_1$  | $T_2, p_1, p_2$   | 9     | $p_1, p_2, v_1$  | $v_2, T_1, T_2$   |
| 4           | $v_1, v_2, T_2$  | $T_1, p_1, p_2$   | 10    | $p_1, p_2, v_2$  | $v_1, T_1, T_2$   |
| 5           | $T_1, T_2, v_1$  | $v_2, p_1, p_2$   | 11    | $v_1, v_2, p_1$  | $p_1, T_1, T_2$   |
| 6           | $T_1, T_2, v_2$  | $v_1, p_1, p_2$   | 12    | $v_1, v_2, p_2$  | $p_2, T_1, T_2$   |

Základní stavové veličiny jsou pro jednotlivé algoritmy vypočítány z rovnic (2.130), (2.131), (2.153).

- 1) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, T_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_1, v_1 = \frac{T_1}{p_1} \cdot r, v_2 = \frac{T_2}{p_2} \cdot r. \quad (4.26)$$

- 2) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_2, v_1 = \frac{T_1}{p_1} \cdot r, v_2 = \frac{T_2}{p_2} \cdot r. \quad (4.27)$$

- 3) Algoritmus pro zadané veličiny:  $v_1, v_2, T_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_2 = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \cdot T_1, p_1 = \frac{T_1}{v_1} \cdot r, p_2 = \frac{T_2}{v_2} \cdot r. \quad (4.28)$$

- 4) Algoritmus pro zadané veličiny:  $v_1, v_2, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$T_1 = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa-1} \cdot T_2, p_1 = \frac{T_1}{v_1} \cdot r, p_2 = \frac{T_2}{v_2} \cdot r. \quad (4.29)$$

- 5) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, v_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin



$$v_2 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot v_1, p_1 = \frac{T_1}{v_1} \cdot r, p_2 = \frac{T_2}{v_2} \cdot r. \quad (4.30)$$

6) Algoritmus pro zadané veličiny:  $T_1, T_2, v_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \cdot v_2, p_1 = \frac{T_1}{v_1} \cdot r, p_2 = \frac{T_2}{v_2} \cdot r. \quad (4.31)$$

7) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, T_1, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_2 = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot p_1, v_1 = \frac{T_1}{p_1} \cdot r, v_2 = \frac{T_2}{p_2} \cdot r. \quad (4.32)$$

8) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_2, T_1, T_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_1 = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot p_2, v_1 = \frac{T_1}{p_1} \cdot r, v_2 = \frac{T_2}{p_2} \cdot r. \quad (4.33)$$

9) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, v_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_2 = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_1, T_1 = \frac{v_1}{r} \cdot p_1, T_2 = \frac{v_2}{r} \cdot p_2. \quad (4.34)$$

10) Algoritmus pro zadané veličiny:  $p_1, p_2, v_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$v_1 = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot v_2, T_1 = \frac{v_1}{r} \cdot p_1, T_2 = \frac{v_2}{r} \cdot p_2. \quad (4.35)$$

11) Algoritmus pro zadané veličiny:  $v_1, v_2, p_1$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_2 = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa} \cdot p_1, T_1 = \frac{v_1}{r} \cdot p_1, T_2 = \frac{v_2}{r} \cdot p_2. \quad (4.36)$$

12) Algoritmus pro zadané veličiny:  $v_1, v_2, p_2$ . Výpočet zbylých základních stavových veličin

$$p_1 = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\kappa} \cdot p_2, T_1 = \frac{v_1}{r} \cdot p_1, T_2 = \frac{v_2}{r} \cdot p_2. \quad (4.37)$$

## 4.3 Výpočet změn energetických stavových veličin ideálního plynu

### 4.3.1 Změna vnitřní energie a entalpie

Během izochorické, izobarické a izoentropické vratné změny stavu ideálního plynu je  $\Delta U_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.68),  $\Delta H_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.73),  $\Delta u_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.67) a  $\Delta h_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.72).

V kapitole 2.8.3 je popsáno, že během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu je  $\Delta U_{12} = 0$  a  $\Delta H_{12} = 0$ , resp.  $\Delta u_{12} = 0$  a  $\Delta h_{12} = 0$ .

### 4.3.2 Změna entropie

Během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu je  $\Delta S_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.88) a  $\Delta s_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.87).

Během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu je  $\Delta S_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.102) a  $\Delta s_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.101).

Během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu je  $\Delta S_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.126) a  $\Delta s_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.125).

V kapitole 2.8.4 je popsáno, že během izoentropické změny stavu ideálního plynu je  $\Delta S_{12} = 0$  resp.  $\Delta s_{12} = 0$ .

## 4.4 Výpočet procesních veličin

### 4.4.1 Objemová práce

V kapitole 2.8.1 je popsáno, že během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu je  $W_{12} = 0$  resp.  $w_{12} = 0$ .

Během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu je  $W_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.97) a  $w_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.96).

Během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu je  $W_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.114) a  $w_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.113).

Během izoentropické změny stavu ideálního plynu je  $W_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.134) a  $w_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.133).

### 4.4.2 Technická práce

Během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu je  $W_{t12}$  vypočítáno z rovnice (2.82) a  $w_{t12}$  vypočítáno z rovnice (2.81).

V kapitole 2.8.2 je popsáno, že během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu je  $W_{t12} = 0$  resp.  $w_{t12} = 0$ .

Během izotermické vratné změny stavu ideálního plynu je  $W_{t12}$  vypočítáno z rovnice (2.119) a  $w_{t12}$  vypočítáno z rovnice (2.118).

Během izoentropické změny stavu ideálního plynu je  $W_{t12}$  vypočítáno z rovnice (2.138) a  $w_{t12}$  vypočítáno z rovnice (2.137).

### 4.4.3 Teplo

Během izochorické vratné změny stavu ideálního plynu je  $Q_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.85) a  $q_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.84).

Během izobarické vratné změny stavu ideálního plynu je  $Q_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.99) a  $q_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.98).

Během izotermické změny stavu ideálního plynu je  $Q_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.123) a  $q_{12}$  vypočítáno z rovnice (2.122).

V kapitole 2.8.4 je popsáno, že během izoentropické změny stavu ideálního plynu je  $Q_{12} = 0$  resp.  $q_{12} = 0$ .

#### 4.5 Převod jednotek

Program je ve výchozím stavu nastaven do základních jednotek pro zadání i zobrazení výsledků výpočtů.

Uživatel má při zadání základních stavových veličin možnost volby jednotek. Jakmile zvolí jednotku, program hodnotu veličiny automaticky převede na základní jednotku, protože výpočet probíhá vždy v základních jednotkách a všechny algoritmy jsou takto naprogramovány. Tento převod uživatel nikde nevidí.

Druhá možnost, kdy se uživatel setká s převodem jednotek, je při zobrazení výsledků. Výsledky jsou zobrazeny v základních jednotkách, a uživatel má možnost zvolit jednotku, pro kterou následně program okamžitě převede daný výsledek.

V tab. 9 je uveden přehled veličin a jednotek, které má uživatel možnost zvolit. Jednotky pro program byly vybrány na základě příkladů počítaných na cvičeních a přednáškách v předmětu Termodynamika a sdílení tepla.

**Tab. 9:** Přehled veličin a jednotek.

| veličiny         | jednotky  | veličiny                 | jednotky | veličiny        | jednotky          |
|------------------|-----------|--------------------------|----------|-----------------|-------------------|
| $p_1, p_2$       | $Pa$      | $V_1, V_2$               | $m^3$    | $t_1, t_2$      | $^{\circ}C$       |
|                  | $kPa$     |                          | $dm^3$   | $\Delta S_{12}$ | $J/(kg \cdot K)$  |
|                  | $MPa$     |                          | $cm^3$   |                 | $kJ/(kg \cdot K)$ |
| $v_1, v_2$       | $m^3/kg$  | $wt_{12}, w_{12},$       | $J/kg$   | $\Delta S_{12}$ | $MJ/(kg \cdot K)$ |
|                  | $dm^3/kg$ | $q_{12}, \Delta u_{12},$ | $kJ/kg$  |                 | $J/K$             |
|                  | $cm^3/kg$ | $\Delta h_{12}$          | $MJ/kg$  |                 | $kJ/K$            |
|                  | $m^3/g$   | $Wt_{12}, W_{12},$       | $J$      |                 | $MJ/K$            |
| $\rho_1, \rho_2$ | $kg/m^3$  | $Q_{12}, \Delta U_{12},$ | $kJ$     |                 |                   |
| $m$              | $kg$      | $\Delta H_{12}$          | $MJ$     |                 |                   |
|                  | $g$       | $T_1, T_2$               | $K$      |                 |                   |

## Závěr

Byl sestaven výpočetní program pro výpočet základních vratných změn stavu v ideálním plynu. Tento program pro zadaný děj a zadaný plyn počítá základní stavové veličiny a procesní veličiny.

V teoretické části byl uveden přehled základních vratných změn v ideálním plynu a všech vztahů potřebných k výpočtu. Praktická část popisuje algoritmy výpočtu, podle nichž byl následně naprogramován výpočetní program.

Výsledkem je samostatně fungující program typu \*.exe, ve kterém uživatel nejprve na vstupu vybere plyn. Při výběru plynu má dvě možnosti. První možností je výběr plynu ze seznamu a pro zvolený plyn jsou následně zobrazeny jeho vlastnosti. Druhou alternativou je manuální zadání, při němž některé vlastnosti plynu zadá a ostatní program dopočítá a zobrazí. Poté, co program zná vlastnosti ideálního plynu, jsou zvoleny hodnoty známých základních stavových veličin a děj. Na základě těchto parametrů může program provést výpočet. Výstupem jsou dopočítané hodnoty základních stavových veličin, změn energetických stavových veličin mezi počátečním a konečným stavem a procesní veličiny mezi počátečním a konečným stavem.

Program je kompatibilní se systémem Windows 7 a vyšší, a s minimální verzí ovladače .NET Framework 4.5.1. Pro plnou funkčnost je nezbytné tyto minimální parametry dodržet.

Výpočetní program byl vyzkoušen a odladěn. Jeho funkčnost byla ilustrována na několika příkladech.

Na bakalářskou práci by se dalo navázat rozšířením o výpočet v molárních veličinách nebo rozšířením v podobě výpočtu polytropické vratné změny stavu ideálního plynu. Dále by se celá tato práce dala doplnit o grafický výstup v podobě  $p - V$  diagramu nebo  $T - S$  diagramu, jejichž názornost byla využita v teoretické části této práce, avšak výstup v podobě diagramů by mohl studentům ještě více pomoci v pochopení dané problematiky.

## Literatura a seznam použitých zdrojů

- [1] Předměty | ČVUT Fakulta strojní. *ČVUT Fakulta strojní* [online]. Copyright © 2014 [cit. 5.1.2017]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-mechaniky-tekutin-a-termodynamiky/ustav-mechaniky-tekutin-a-termodynamiky-12112/vyuka-12112/predmety-12112/>
- [2] Termomechanika. *VUT Fakulta strojního inženýrství* [online]. [cit. 5.1.2017]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/termomechanika/>
- [3] Katedra energetiky, VŠB-TU Ostrava. *VŠB-TUO* [online]. Copyright © Grafické studio Marionetti 2017 [cit. 5.1.2017]. Dostupné z: <http://katedry.fs.vsb.cz/energetika/studijni-materialy.php>
- [4] Katedra energetických strojů a zařízení Skripta. *Katedra energetických strojů a zařízení* [online]. Copyright © 1991 [cit. 7.1.2017]. Dostupné z: <http://kke.zcu.cz/about/projekty/mtm/e-skripta.html>
- [5] UJEP | Fakulta výrobních technologií a managementu. *UJEP | Fakulta výrobních technologií a managementu* [online]. Copyright © FVTM 2008 [cit. 8.1.2017]. Dostupné z: <http://cz.fvtm.ujep.cz/>
- [6] Databáze závěrečných prací. *FS ČVUT* [online]. [Cit. 10.1.2017]. Dostupné z: <https://diplomky.fs.cvut.cz/v2/>
- [7] Závěrečné práce – VUT v Brně. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. [Cit. 16.2.2017]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace>
- [8] DSpace VŠB-TUO. *DSpace VŠB-TUO* [online]. Copyright © [cit. 10.1.2017]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/>
- [9] DSpace at University of West Bohemia. *DSpace at University of West Bohemia: NO TITLE* [online]. [Cit. 10.1.2017]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/>
- [10] Katalog ZČU. *Západočeská univerzita v Plzni* [online]. Copyright ©2004 [cit. 10.1.2017]. Dostupné z: <https://alfred.uk.zcu.cz/>
- [11] Vědecká knihovna UJEP. *UJEP* [online]. Copyright ©1993 [cit. 10.1.2017]. Dostupné z: <http://arl.ujep.cz/i2/i2.entry.cls?ictx=ujep&skin=1&language=2&ascii=0>
- [12] STŘEDA, Ivo. *Základy rovnovážné termodynamiky*. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-459-7.


- [13] NOŽIČKA, Jiří. *Základy termomechaniky*. 2. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04022-5.
- [14] PETŘÍKOVÁ, Markéta a Pavel KRYŠTŮFEK. *Tabulky a diagramy pro termodynamiku*. 5. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. ISBN 978-80-7372-945-5.
- [15] NOŽIČKA, Jiří, Blanka VÁRADIOVÁ a Josef ADAMEC. *Termomechanika: sbírka příkladů*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02015-0.
- [16] *Katedra / KEZ - katedra energetických zařízení TUL* [online]. Copyright ©2011-2016 [cit. 10.1.2017] Dostupné z: <http://www.kez.tul.cz/cs/studenti/zobraz-predmet-obsah-cvicici/77>

## **Seznam příloh**

Příloha 1: Návod pro použití výpočetního programu

Příloha 2: Ilustrace funkčnosti programu

# Příloha 1: Návod pro použití výpočetního programu


 Ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

**Výběr plynu**  
 Ze seznamu

**Vlastnosti plynu**  
 $r$  [J/(kg K)]   
 $c_p$  [J/(kg K)]   
 $c_v$  [J/(kg K)]   
 $M$  [kg/kmol]   
 $\kappa$  [-]

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1   $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$   
 Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:   
 Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2   $p_2$    $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$


**Zadej hodnoty zadaných stavových veličin**  
 $p_1$  [Pa]   $T_1$  [K]   $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg]   $V_1$  [m<sup>3</sup>]   $m$  [kg]   
 $p_2$  [Pa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg]   $V_2$  [m<sup>3</sup>]

**Vypočítej**

**Vypočítané základní stavové veličiny**  
 $p_1$  [Pa]   $T_1$  [K]   $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg]   
 $p_2$  [Pa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg]

**Vypočítané změny energetických stavových veličin**  
 $\Delta s_{re}$  [J/(kg K)]   $\Delta u_{re}$  [J/kg]   $\Delta h_{re}$  [J/kg]

**Vypočítané procesní veličiny**  
 $w_{re}$  [J/kg]   $w_{ts}$  [J/kg]   $q_{re}$  [J/kg]


 Výukový program Technické univerzity v Liberci

© Adam Buriánek 2017

**Obrázek 5:** Po spuštění programu



## Příklad

Zadání:

Vypočítejte termické stavové veličiny, měrnou objemovou práci a změnu měrné entropie během izobarického změny stavu vodíku při tlaku  $p$ , je-li jeho teplota v počátečním stavu  $t_1$  a teplota v konečném stavu  $t_2$ . [15].

Zadané parametry:

$$p = 1 \text{ MPa}, t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 300,133 \text{ }^\circ\text{C} [15].$$

Postup řešení příkladu pomocí programu:

Volba ideálního plynu

The screenshot shows a software application window titled "Ideální plyn | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017". The interface is in Czech. At the top left, there is a "Výběr plynu" (Gas selection) dropdown menu with a "Manuálně" (Manual) button. The dropdown menu is open, showing options: "Zvol plyn", "Zvol plyn", "Vzduch", "Helium He", "Neon Ne", and "Vodík H2" (highlighted). Below the dropdown, there is a "Načti" (Load) button and a "Zadej hodnoty" (Enter values) section with input fields for p1, p2, T1, T2, V1, V2, v1, v2, and h1, h2. The "Vlastnosti plynu" (Gas properties) section shows values for r [J/(kg K)], cp [J/(kg K)], cv [J/(kg K)], M [kg/kmol], and kappa []. A "RESET" button is located in the top right. The "Vypočítané" (Calculated) section shows results for p1, p2, T1, T2, v1, v2, delta s12, delta u12, w12, and q12. The bottom right corner of the window contains the text "© Adam Buriánek 2017" and "Výukový program Technické univerzity v Liberci".

Obrázek 6: Výběr plynu ze seznamu

IP | Ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu  
 Ze seznamu **Manuálně**  
**Vodík H<sub>2</sub>**

Vlastnosti plynu  
 $r$  [J/(kg K)] 4124.13  
 $cp$  [J/(kg K)] 14434.46  
 $cv$  [J/(kg K)] 10310.33  
 $M$  [kg/kmol] 1.00797  
 $\kappa$  [-] 1.4

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1  
  $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá: **Zvol průběh**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2  
  $p_2$    $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

$p_1$  Pa 0,000  $T_1$  [K] 0,00  $v_1$  m<sup>2</sup>/kg 0,00000  $V_1$  m<sup>3</sup> 0,00  $m$  kg 0,00

$p_2$  Pa 0,000  $T_2$  [K] 0,00  $v_2$  m<sup>2</sup>/kg 0,00000  $V_2$  m<sup>3</sup> 0,00

**Vypočítej**

Vypočítané základní stavové veličiny  
 $p_1$  Pa 0  $T_1$  [K] 0  $v_1$  [m<sup>2</sup>/kg] 0

$p_2$  Pa 0  $T_2$  [K] 0  $v_2$  [m<sup>2</sup>/kg] 0

Vypočítané změny energetických stavových veličin  
 $\Delta s_{12}$  J/(kg K) 0  $\Delta u_{12}$  J/kg 0  $\Delta h_{12}$  J/kg 0

Vypočítané procesní veličiny  
 $w_{12}$  J/kg 0  $w_{12}$  J/kg 0  $q_{12}$  J/kg 0

Výukový program Technické univerzity v Liberci © Adam Buriánek 2017

Obrázek 7: Načtení vlastností zvoleného plynu

IE: ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu

Manuálně

Ze seznamu

Kombinace zadání

Kombinace zadání

M<sub>r</sub> [kg/kmol] 0,00 κ [-] 1,01

cp [J/(kg K)] 0,00 cv [J/(kg K)] 0,00 r [J/(kg K)] 0,00

Vlastnosti plynu

r [J/(kg K)] 0

cp [J/(kg K)] 0

cv [J/(kg K)] 0

M [kg/kmol] 0

κ [-] 0

RESET

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1

p<sub>1</sub>  T<sub>1</sub>  t<sub>1</sub>  v<sub>1</sub>  p<sub>1</sub>  V<sub>1</sub>  m

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2

p<sub>2</sub>  T<sub>2</sub>  t<sub>2</sub>  v<sub>2</sub>  p<sub>2</sub>  V<sub>2</sub>

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

p<sub>1</sub> [Pa] 0,000 T<sub>1</sub> [K] 0,00 v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 0,00000 V<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>] 0,00 m [kg] 0,00

p<sub>2</sub> [Pa] 0,000 T<sub>2</sub> [K] 0,00 v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 0,00000 V<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>] 0,00

Vypočítej

Vypočítané základní stavové veličiny

p<sub>1</sub> [Pa] 0 T<sub>1</sub> [K] 0 v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 0

p<sub>2</sub> [Pa] 0 T<sub>2</sub> [K] 0 v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 0

Vypočítané změny energetických stavových veličin

Δ s<sub>12</sub> [J/(kg K)] 0 Δ u<sub>12</sub> [J/kg] 0 Δ h<sub>12</sub> [J/kg] 0

Vypočítané procesní veličiny

W<sub>12</sub> [J/kg] 0 w<sub>12</sub> [J/kg] 0 q<sub>12</sub> [J/kg] 0

Výukový program Technické univerzity v Liberci

© Adam Buriánek 2017

**Obrázek 8:** Manuální výběr plynu (uživatel použije v případě, kdy mu nevyhovují plyny v seznamu)

Volba zadaných stavových veličin a průběhu děje

IP: Ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu: Ze seznamu Manuálně Vodík H<sub>2</sub>

Vlastnosti plynu:  
 $r$  [J/(kg K)] 4124,13  
 $c_p$  [J/(kg K)] 14434,46  
 $c_v$  [J/(kg K)] 10310,33  
 $M$  [kg/kmol] 1,00797  
 $\kappa$  [-] 1,4

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1:   $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá: Zvol průběh

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2:   $p_2$    $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin:

|            |       |            |      |                            |          |                         |      |          |      |
|------------|-------|------------|------|----------------------------|----------|-------------------------|------|----------|------|
| $p_1$ [Pa] | 0,000 | $t_1$ [°C] | 0,00 | $v_1$ [m <sup>3</sup> /kg] | 0,000000 | $V_1$ [m <sup>3</sup> ] | 0,00 | $m$ [kg] | 0,00 |
| $p_2$ [Pa] | 0,000 | $T_2$ [K]  | 0,00 | $v_2$ [m <sup>3</sup> /kg] | 0,000000 | $V_2$ [m <sup>3</sup> ] | 0,00 |          |      |

**Vypočítej**

Vypočítané základní stavové veličiny:  
 $p_1$  [Pa] 0  $T_1$  [K] 0  $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg] 0  
 $p_2$  [Pa] 0  $T_2$  [K] 0  $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg] 0

Vypočítané změny energetických stavových veličin:  
 $\Delta s_{12}$  [J/(kg K)] 0  $\Delta u_{12}$  [J/kg] 0  $\Delta h_{12}$  [J/kg] 0

Vypočítané procesní veličiny:  
 $w_{12}$  [J/kg] 0  $w_{f12}$  [J/kg] 0  $q_{12}$  [J/kg] 0

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 9: Zaškrtnutí zadaných stavových veličin ve stavu 1

IP Ideální plyn | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu  
 Ze seznamu **Manuálně** Vodík H<sub>2</sub> Načti

Vlastnosti plynu  
 $r$  [J/(kg K)] 4124.13  
 $c_p$  [J/(kg K)] 14434.46  
 $c_v$  [J/(kg K)] 10310.33  
 $M$  [kg/kmol] 1.00797  
 $\kappa$  [-] 1.4

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1   $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:  
 Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2   $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin  
 $p_1$  Pa 0.000  $t_1$  [°C] 0.00  $v_1$  m<sup>3</sup>/kg 0.00000  $V_1$  m<sup>3</sup> 0.00  $m$  kg 0.00  
 $p_2$  Pa 0.000  $T_2$  [K] 0.00  $v_2$  m<sup>3</sup>/kg 0.00000  $V_2$  m<sup>3</sup> 0.00

Vypočítané základní stavové veličiny  
 $p_1$  Pa 0  $T_1$  [K] 0  $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg] 0  
 $p_2$  Pa 0  $T_2$  [K] 0  $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg] 0

Vypočítané změny energetických stavových veličin  
 $\Delta s_{12}$  J/(kg K) 0  $\Delta u_{12}$  J/kg 0  $\Delta h_{12}$  J/kg 0

Vypočítané procesní veličiny  
 $w_{12}$  J/kg 0  $w_{f12}$  J/kg 0  $q_{12}$  J/kg 0

**RESET**

Vypočítej

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 10: Volba průběhu děje

IP Ideální plyn | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu  
 Ze seznamu **Manuálně**  
**Vodík H<sub>2</sub>**  
 Načti

Vlastnosti plynu  
 $r$  [J/(kg K)] 4124.13  
 $cp$  [J/(kg K)] 14434.46  
 $cv$  [J/(kg K)] 10310.33  
 $M$  [kg/kmol] 1.00797  
 $\kappa$  [-] 1.4

RESET

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1  
  $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $\rho_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:  
 izobaricky

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2  
  $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

$p_1$  Pa 0.000  $t_1$  [°C] 0.00  $v_1$  m<sup>3</sup>/kg 0.00000  $V_1$  m<sup>3</sup> 0.00  $m$  kg 0.00

$p_2$  Pa 0.000  $T_2$  [K] 0.00  $v_2$  m<sup>3</sup>/kg 0.00000  $V_2$  m<sup>3</sup> 0.00

Vypočítej

Vypočítané základní stavové veličiny  
 $p_1$  Pa 0  $T_1$  [K] 0  $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg] 0

$p_2$  Pa 0  $T_2$  [K] 0  $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg] 0

Vypočítané změny energetických stavových veličin  
 $\Delta s_{12}$  J/(kg K) 0  $\Delta u_{12}$  J/kg 0  $\Delta h_{12}$  J/kg 0

Vypočítané procesní veličiny  
 $w_{12}$  J/kg 0  $w_{f12}$  J/kg 0  $q_{12}$  J/kg 0

Výukový program Technické univerzity v Liberci  
 © Adam Buriánek 2017

Obrázek 11: Zaškrtnutí zadaných stavových veličin ve stavu 2

## Volba jednotek a zadání hodnot základních stavových veličin

IP: Ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu  
 Ze seznamu **Manuálně**  
**Vodík H<sub>2</sub>**  
 Načti

Vlastnosti plynu  
 $r$  [J/(kg K)] 4124.13  
 $c_p$  [J/(kg K)] 14434.46  
 $c_v$  [J/(kg K)] 10310.33  
 $M$  [kg/kmol] 1.00797  
 $\kappa$  [-] 1.4

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1  
  $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$   
 Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá: **izobaricky**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2  
  $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin  
 $p_1$   $\text{Pa}$  1.000  $t_1$  [°C] 0.00  $v_1$   $\text{m}^3/\text{kg}$  0.00000  $V_1$   $\text{m}^3$  0.00  $m$   $\text{kg}$  0.00  
 $p_2$   $\text{kPa}$  0.000  $T_2$  [K] 0.00  $v_2$   $\text{m}^3/\text{kg}$  0.00000  $V_2$   $\text{m}^3$  0.00

**Vypočítej**

Vypočítané základní stavové veličiny  
 $p_1$   $\text{Pa}$  0  $T_1$  [K] 0  $v_1$  [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] 0  
 $p_2$   $\text{Pa}$  0  $T_2$  [K] 0  $v_2$  [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ] 0

Vypočítané změny energetických stavových veličin  
 $\Delta s_{12}$  [J/(kg K)] 0  $\Delta u_{12}$  [J/kg] 0  $\Delta h_{12}$  [J/kg] 0

Vypočítané procesní veličiny  
 $w_{12}$  [J/kg] 0  $w_{f12}$  [J/kg] 0  $q_{12}$  [J/kg] 0

Výukový program Technické univerzity v Liberci © Adam Buriánek 2017

Obrázek 12: Volba jednotek pro zadané základní stavové veličiny

IP | Ideální plyny | Výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu

Ze seznamu

Vlastnosti plynu

$r$  [J/(kg K)]

$c_p$  [J/(kg K)]

$c_v$  [J/(kg K)]

$M$  [kg/kmol]

$\kappa$  [-]

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1

$p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $\rho_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2

$T_2$    $t_2$    $v_2$    $\rho_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

$p_1$  [MPa]   $t_1$  [°C]   $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg]   $V_1$  [m<sup>3</sup>]   $m$  [kg]

$p_2$  [Pa]   $t_2$  [°C]   $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg]   $V_2$  [m<sup>3</sup>]

Vypočítané základní stavové veličiny

$p_1$  [Pa]   $T_1$  [K]   $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg]

$p_2$  [Pa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg]

Vypočítané změny energetických stavových veličin

$\Delta s_{12}$  [J/(kg K)]   $\Delta u_{12}$  [J/kg]   $\Delta h_{12}$  [J/kg]

Vypočítané procesní veličiny

$w_{12}$  [J/kg]   $w_{f12}$  [J/kg]   $q_{12}$  [J/kg]

Výukový program Technické univerzity v Liberci

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 13: Zadání hodnot základních stavových veličin



IP | Ideální plyny | Výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu

Ze seznamu

Vlastnosti plynu

r [J/(kg K)]   
 cp [J/(kg K)]   
 cv [J/(kg K)]   
 M [kg/kmol]   
 κ [-]

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1  p<sub>1</sub>  T<sub>1</sub>  t<sub>1</sub>  v<sub>1</sub>  ρ<sub>1</sub>  V<sub>1</sub>  m

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2  T<sub>2</sub>  t<sub>2</sub>  v<sub>2</sub>  ρ<sub>2</sub>  V<sub>2</sub>

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

p<sub>1</sub> [MPa]  t<sub>1</sub> [°C]  v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg]  V<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>]  m [kg]   
 p<sub>2</sub> [Pa]  t<sub>2</sub> [°C]  v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg]  V<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>]

Vypočítej

Vypočítané základní stavové veličiny

p<sub>1</sub> [Pa]  T<sub>1</sub> [K]  v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg]   
 p<sub>2</sub> [Pa]  T<sub>2</sub> [K]  v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg]

Vypočítané změny energetických stavových veličin

Δ s<sub>12</sub> [J/(kg K)]  Δ u<sub>12</sub> [J/kg]  Δ h<sub>12</sub> [J/kg]

Vypočítané procesní veličiny

w<sub>12</sub> [J/kg]  w<sub>t,12</sub> [J/kg]  q<sub>12</sub> [J/kg]

Výukový program Technické univerzity v Liberci

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 14: Výpočet

IP: Ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu  
 Ze seznamu

Vlastnosti plynu  
 $r$  [J/(kg K)]   
 $c_p$  [J/(kg K)]   
 $c_v$  [J/(kg K)]   
 $M$  [kg/kmol]   
 $\kappa$  [-]

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1  
  $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2  
  $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

|             |                                    |            |                                     |               |                                      |            |                                   |          |                                   |
|-------------|------------------------------------|------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------------|------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|
| $p_1$ [MPa] | <input type="text" value="1.000"/> | $t_1$ [°C] | <input type="text" value="20.00"/>  | $v_1$ [m³/kg] | <input type="text" value="0.00000"/> | $V_1$ [m³] | <input type="text" value="0.00"/> | $m$ [kg] | <input type="text" value="0.00"/> |
| $p_2$ [Pa]  | <input type="text" value="0.000"/> | $t_2$ [°C] | <input type="text" value="300.13"/> | $v_2$ [m³/kg] | <input type="text" value="0.00000"/> | $V_2$ [m³] | <input type="text" value="0.00"/> |          |                                   |

Vypočítej

Vypočítané základní stavové veličiny

|            |                                      |           |                                      |               |                                     |
|------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| $p_1$ [Pa] | <input type="text" value="1000000"/> | $T_1$ [K] | <input type="text" value="293.15"/>  | $v_1$ [m³/kg] | <input type="text" value="1.209"/>  |
| $p_2$ [Pa] | <input type="text" value="1000000"/> | $T_2$ [K] | <input type="text" value="573.283"/> | $v_2$ [m³/kg] | <input type="text" value="2.3643"/> |

Vypočítané změny energetických stavových veličin

|                             |                                      |                         |   |                         |   |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------------|---|-------------------------|---|
| $\Delta s_{12}$ [J/(kg K)]  | <input type="text" value="9681.12"/> | $\Delta u_{12}$ [J/kg]  | <input type="text" value="2888262.75"/> | $\Delta h_{12}$ [J/kg]  | <input type="text" value="4043567.85"/> |
| $\Delta s_{12}$ [kJ/(kg K)] | <input type="text" value="9.68112"/> | $\Delta u_{12}$ [kJ/kg] | <input type="text" value="2888.26275"/> | $\Delta h_{12}$ [kJ/kg] | <input type="text" value="4043.56785"/> |

Vypočítané změny energetických stavových veličin

|                  |  |                  |                                |                  |   |
|------------------|--|------------------|--------------------------------|------------------|---|
| $w_{12}$ [MJ/kg] | <input type="text" value="1.1553051"/> | $w_{12}$ [J/kg]  | <input type="text" value="0"/> | $q_{12}$ [J/kg]  | <input type="text" value="4043567.85"/> |
| $w_{12}$ [kJ/kg] | <input type="text" value="1.1553051"/> | $w_{12}$ [kJ/kg] | <input type="text" value="0"/> | $q_{12}$ [kJ/kg] | <input type="text" value="4043.56785"/> |

Výukový program Technické univerzity v Liberci

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 15: Převod jednotek výsledku

IP Ideální plyny | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu: Manuálně Vodík H<sub>2</sub> Načít

Vlastnosti plynu

|               |          |
|---------------|----------|
| r [J/(kg K)]  | 4124.13  |
| cp [J/(kg K)] | 14434.46 |
| cv [J/(kg K)] | 10310.33 |
| M [kg/kmol]   | 1.00797  |
| κ [-]         | 1.4      |

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1

p<sub>1</sub>  T<sub>1</sub>  t<sub>1</sub>  v<sub>1</sub>  p<sub>1</sub>  V<sub>1</sub>  m

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá: izobariicky

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2

T<sub>2</sub>  t<sub>2</sub>  v<sub>2</sub>  p<sub>2</sub>  V<sub>2</sub>

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

|                      |       |                     |        |                                     |         |                                  |      |        |      |
|----------------------|-------|---------------------|--------|-------------------------------------|---------|----------------------------------|------|--------|------|
| p <sub>1</sub> [MPa] | 1.000 | t <sub>1</sub> [°C] | 20.00  | v <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /kg] | 0.00000 | V <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> ] | 0.00 | m [kg] | 0.00 |
| p <sub>2</sub> [Pa]  | 0.000 | t <sub>2</sub> [°C] | 300.13 | v <sub>2</sub> [m <sup>3</sup> /kg] | 0.00000 | V <sub>2</sub> [m <sup>3</sup> ] | 0.00 |        |      |

**Vypočítej**

Vypočítané základní stavové veličiny

|                     |         |                    |         |                                     |        |
|---------------------|---------|--------------------|---------|-------------------------------------|--------|
| p <sub>1</sub> [Pa] | 1000000 | T <sub>1</sub> [K] | 293.15  | v <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /kg] | 1.209  |
| p <sub>2</sub> [Pa] | 1000000 | T <sub>2</sub> [K] | 573.283 | v <sub>2</sub> [m <sup>3</sup> /kg] | 2.3643 |

Vypočítané změny energetických stavových veličin

|                              |         |                          |            |                          |            |
|------------------------------|---------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|
| Δs <sub>12</sub> [kJ/(kg K)] | 9.68112 | Δu <sub>12</sub> [MJ/kg] | 2.88826275 | Δh <sub>12</sub> [MJ/kg] | 4.04356785 |
|------------------------------|---------|--------------------------|------------|--------------------------|------------|

Vypočítané procesní veličiny

|                         |           |                         |   |                         |            |
|-------------------------|-----------|-------------------------|---|-------------------------|------------|
| w <sub>12</sub> [MJ/kg] | 1.1553051 | wf <sub>12</sub> [J/kg] | 0 | q <sub>12</sub> [MJ/kg] | 4.04356785 |
|-------------------------|-----------|-------------------------|---|-------------------------|------------|

Výukový program Technické univerzity v Liberci © Adam Buriánek 2017

Obrázek 16: Výsledky výpočtu

## Příloha 2: Ilustrace funkčnosti programu

Následující příklady slouží pro ilustraci funkčnosti programu. Výsledky těchto příkladů spočítané pomocí výpočetního programu jsou uvedeny na dalších stranách.

### Příklad 1

Zadání:

V tlakové nádobě se ohřívá izochoricky kyslík z tlaku  $p_1$  a teploty  $t_1$  na teplotu  $t_2$ . Vypočítejte nezadané termické stavové veličiny počátečního a konečného stavu, měrné sdělné teplo, měrnou tlakovou práci a změnu měrné entropie, pokládáme-li kyslík za ideální plyn [15].

Zadané parametry:

$$p_1 = 10 \text{ MPa}, t_1 = -50 \text{ }^\circ\text{C}, t_2 = 15 \text{ }^\circ\text{C} \text{ [15].}$$

Výsledek:

Obrázek 17 (viz strana XV).

### Příklad 2

Zadání:

Vypočítejte termické stavové veličiny, měrnou objemovou práci a změnu měrné entropie během izobarického změny stavu vodíku při tlaku  $p$ , je-li jeho teplota v počátečním stavu  $t_1$  a měrný objem v konečném stavu  $v_2$  [15].

Zadané parametry:

$$p = 1 \text{ MPa}, t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}, v_2 = 1,23 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ [15].}$$

Výsledek:

Obrázek 18 (viz strana XVI).

### Příklad 3

Zadání:

Izotermická expanze oxidu uhličitého probíhá mezi stavy 1 a 2, je-li dáno  $p_1, p_2$  a  $v_2$ . Stanovte měrnou objemovou a tlakovou práci, měrné sdělné teplo a rozdíl entropií [15].

Zadané parametry:

$$p_1 = 0,5 \text{ MPa}, p_2 = 0,1 \text{ MPa}, v_2 = 0,553 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ [15].}$$

Výsledek:

Obrázek 19 (viz strana XVII).

### Příklad 4

Zadání:

Vypočtete základní stavové veličiny a energetické stavové veličiny na počátku a na konci izoentropické změny stavu o hmotnosti  $m$  vzduchu. Dále vypočtete procesní veličiny, má-li vzduch tlak na počátku děje  $p_1$  a na konci děje  $p_2$  a je-li jeho počáteční teplota  $t_1$  [16].

Zadané parametry:

$$m = 1 \text{ kg}, p_1 = 98\,000 \text{ Pa}, p_2 = 981\,000 \text{ Pa}, t_1 = 30^\circ\text{C} [16].$$

Výsledek:

Obrázek 20 (viz strana XVIII).

**UP** Ideální plyn | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

**Výběr plynu**  
 Ze seznamu:

**Vlastnosti plynu**  
 r [J/(kg K)]: 259.82  
 cp [J/(kg K)]: 909.38  
 cv [J/(kg K)]: 649.56  
 M [kg/kmol]: 15.9994  
 κ [-]: 1.4

**Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1**  
 p<sub>1</sub>  T<sub>1</sub>  t<sub>1</sub>  v<sub>1</sub>  p<sub>1</sub>  V<sub>1</sub>  m

**Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:**  
 p<sub>2</sub>  T<sub>2</sub>  t<sub>2</sub>  v<sub>2</sub>

**Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2**

**Zadej hodnoty zadaných stavových veličin**

p<sub>1</sub> [MPa]: 10.000 t<sub>1</sub> [°C]: -50.00 v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg]: 0.00000 V<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>]: 0.00 m [kg]: 0.00  
 p<sub>2</sub> [Pa]: 0.000 t<sub>2</sub> [°C]: 15.00 v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg]: 0.00000 V<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>]: 0.00

**Vypočítej**

**Vypočítané základní stavové veličiny**  
 p<sub>1</sub> [MPa]: 10 T<sub>1</sub> [K]: 223.15 v<sub>1</sub> [dm<sup>3</sup>/kg]: 5.8  
 p<sub>2</sub> [MPa]: 12.9128389 T<sub>2</sub> [K]: 288.15 v<sub>2</sub> [dm<sup>3</sup>/kg]: 5.8

**Vypočítané změny energetických stavových veličin**  
 Δs<sub>12</sub> [J/(kg K)]: 166.05 Δu<sub>12</sub> [kJ/kg]: 42.2211 Δh<sub>12</sub> [kJ/kg]: 59.10956

**Vypočítané procesní veličiny**  
 w<sub>12</sub> [J/kg]: 0 wf<sub>12</sub> [kJ/kg]: -16.88845 q<sub>12</sub> [kJ/kg]: 42.22111

**RESET**

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 17: Výpočet příkladu 1

IP Ideální plyn | výpočetní program | © Adam Buriánek 2017

Výběr plynu: Manuálně Vodík H<sub>2</sub> Načti

Vlastnosti plynu:  
 $r$  [J/(kg K)] 4124.13  
 $c_p$  [J/(kg K)] 14434.46  
 $c_v$  [J/(kg K)] 10310.33  
 $M$  [kg/kmol] 1.00797  
 $\kappa$  [-] 1.4

p<sub>1</sub>  T<sub>1</sub>  t<sub>1</sub>  v<sub>1</sub>  p<sub>1</sub>  V<sub>1</sub>  m  
 Vrátit změna stavu ideálního plynu probíhá: izobariicky  
 T<sub>2</sub>  t<sub>2</sub>  v<sub>2</sub>  p<sub>2</sub>  V<sub>2</sub>

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

p<sub>1</sub> [MPa] 1.000 t<sub>1</sub> [°C] 20.00 v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 0.00000 V<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>] 0.00 m [kg] 0.00  
 p<sub>2</sub> [MPa] 0.000 T<sub>2</sub> [K] 0.00 v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 1.23000 V<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>] 0.00

Vypočítej

Vypočítané základní stavové veličiny

p<sub>1</sub> [MPa] 1 T<sub>1</sub> [K] 293.15 v<sub>1</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 1.209  
 p<sub>2</sub> [MPa] 1 T<sub>2</sub> [K] 298.24 v<sub>2</sub> [m<sup>3</sup>/kg] 1.23

Vypočítané změny energetických stavových veličin

$\Delta s_{12}$  [J/(kg K)] 248.7  $\Delta u_{12}$  [kJ/kg] 52.52773  $\Delta h_{12}$  [kJ/kg] 73.53882

Vypočítané procesní veličiny

$w_{12}$  [kJ/kg] 21.01109  $w_{f12}$  [kJ/kg] -16.88845  $q_{12}$  [kJ/kg] 73.53882

© Adam Buriánek 2017

**RESET**

Obrázek 18: Výpočet příkladu 2

**Výběr plynu**

Ze seznamu

**Vlastnosti plynu**

$r$  [J/(kg K)]

$c_p$  [J/(kg K)]

$c_v$  [J/(kg K)]

$M$  [kg/kmol]

$\kappa$  [-]

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1   $p_1$    $T_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2   $p_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

$p_1$  [MPa]   $T_1$  [K]   $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg]   $V_1$  [m<sup>3</sup>]   $m$  [kg]

$p_2$  [MPa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg]   $V_2$  [m<sup>3</sup>]

**Vypočítej**

Vypočítané základní stavové veličiny

$p_1$  [Pa]   $T_1$  [K]   $v_1$  [m<sup>3</sup>/kg]

$p_2$  [Pa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m<sup>3</sup>/kg]

Vypočítané změny energetických stavových veličin

$\Delta s_{12}$  [J/kg K]   $\Delta u_{12}$  [J/kg]   $\Delta h_{12}$  [J/kg]

Vypočítané procesní veličiny

$w_{12}$  [J/kg]   $w_{f12}$  [J/kg]   $q_{12}$  [J/kg]

© Adam Buriánek 2017

Obrázek 19: Výpočet příkladu 3

**Výběr plynu**

Ze seznamu

**Vlastnosti plynu**

$r$  [J/(kg K)]

$c_p$  [J/(kg K)]

$c_v$  [J/(kg K)]

$M$  [kg/kmol]

$\kappa$  [-]

**RESET**

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 1   $p_1$    $T_1$    $t_1$    $v_1$    $p_1$    $V_1$    $m$

Vratná změna stavu ideálního plynu probíhá:

Zaškrtni zadané veličiny ve stavu 2   $p_2$    $T_2$    $t_2$    $v_2$    $p_2$    $V_2$

Zadej hodnoty zadaných stavových veličin

$p_1$  [Pa]   $t_1$  [°C]   $v_1$  [m³/kg]   $V_1$  [m³]   $m$  [kg]

$p_2$  [Pa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m³/kg]   $V_2$  [m³]

Vypočítej

Vypočítané základní stavové veličiny

$p_1$  [Pa]   $T_1$  [K]   $v_1$  [m³/kg]   $V_1$  [m³]   $m$  [kg]

$p_2$  [Pa]   $T_2$  [K]   $v_2$  [m³/kg]   $V_2$  [m³]

Vypočítané změny energetických stavových veličin

$\Delta s_{12}$  [J/kg K]   $\Delta u_{12}$  [J/kg]   $\Delta h_{12}$  [J/kg]   $\Delta s_{12}$  [J/K]   $\Delta U_{12}$  [J]   $\Delta H_{12}$  [J]

Vypočítané procesní veličiny

$w_{12}$  [J/kg]   $w_{f12}$  [J/kg]   $Q_{12}$  [J/kg]   $W_{12}$  [J]   $Q_{12}$  [J]

Výukový program Technické univerzity v Liberci © Adam Buriánek 2017

Obrázek 20: Výpočet příkladu 4