

3. Voda a vodní pára – termodynamika

Základy energetiky

Vyučující

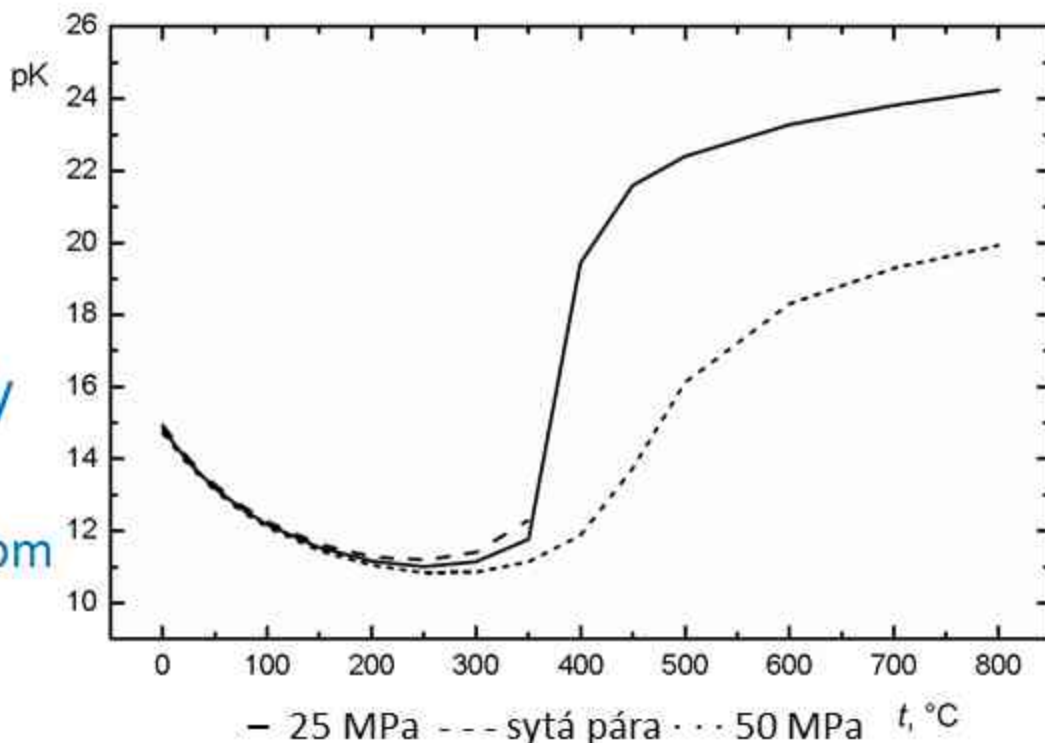
Luděk Jelínek

Voda v energetice

- Pracovní médium
 - voda/pára – napájecí voda parogenerátorů
 - vodní elektrárny (přehradní, přílivové)
 - využití gradientu solnosti
- Teplonosné /chladicí médium
 - teplárenství
 - chladicí okruhy
 - jaderné elektrárny
- Moderátor
 - jaderné elektrárny
- Výroba zařízení
 - elektronika – superčistá voda
 - strojírenství

Je čistá voda jen H_2O ? ... ? ... **NE**

- Autoprotolýza vody
 - vznik H^+ a OH^- iontů
 - závisí na teplotě
- Izotopové složení vody
 - rozlišujeme ^1H a ^2H
 - $^2\text{H}/^1\text{H} = 155.76 \pm 0.1 \text{ ppm}$
Vienna Standard Mean Ocean Water
 - $^2\text{H}_2\text{O}$ – těžká voda
 - $\text{pD} @ 25^\circ\text{C} = 7,43^*$
 - o kyslíku nemluvě



Zdroj obrázku: Kritzer P.: J. Supercrit. Fluids 29, 1 (2004)

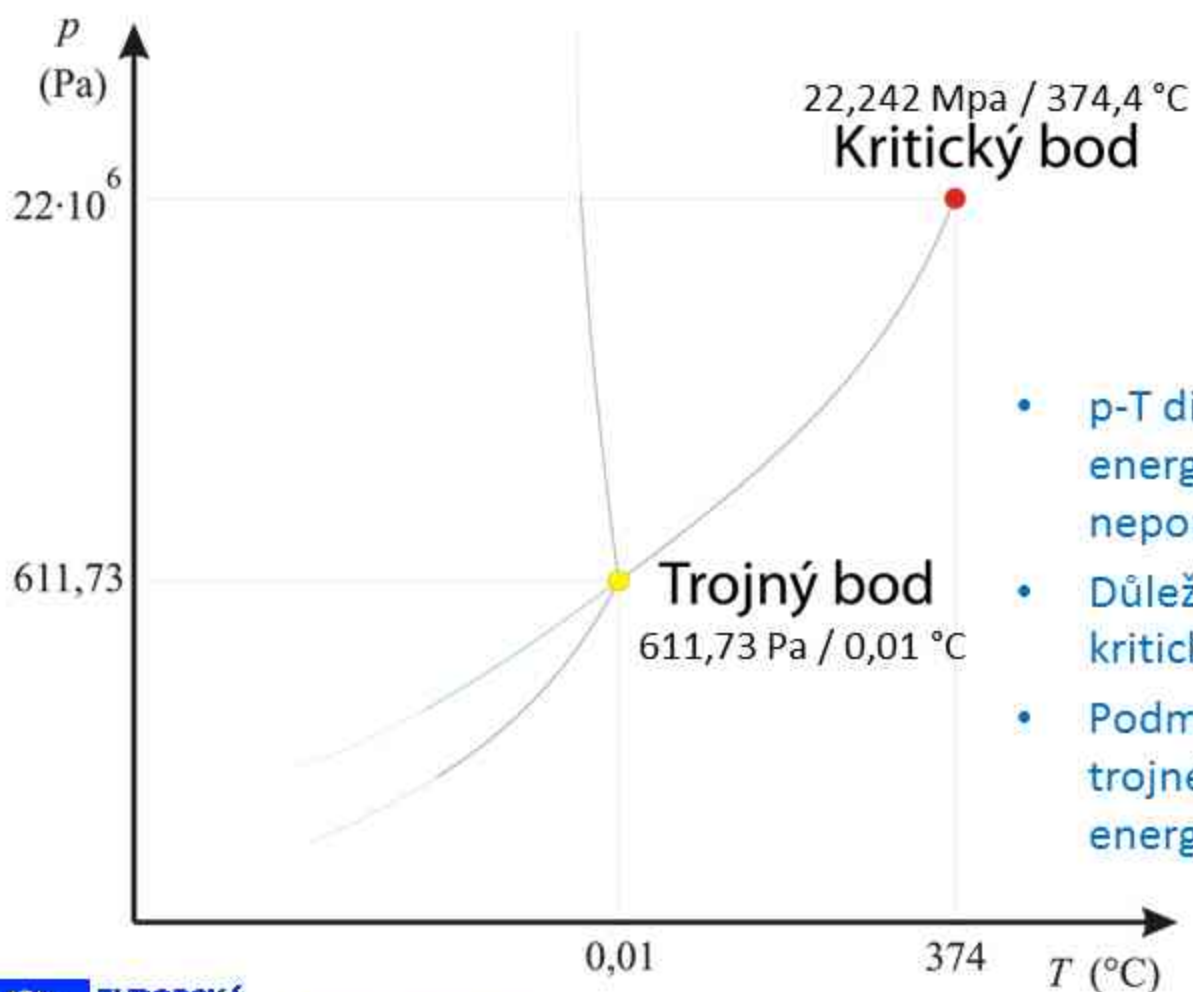
* D. R. Lide Ed., *CRC Handbook of chemistry and physics*, 80th Ed. (CRC Press, Boca Raton, 1999)

Stavové chování vody

- oblast trojného bodu
 - p-T diagramu (Clapeyron)
- Přejchod voda-vodní pára
 - **p-V diagram**
 - klasické znázornění Carnotova cyklu
 - **T-s diagram**
 - jednoduché znázornění Carnotova a Rankinova cyklu
 - **h-s diagram** (Mollier)
 - snadná entalpická bilance
 - h-x diagram (Mollier)
 - Relativní/absolutní vlhkost vzduchu
 - entalpie vzduchu

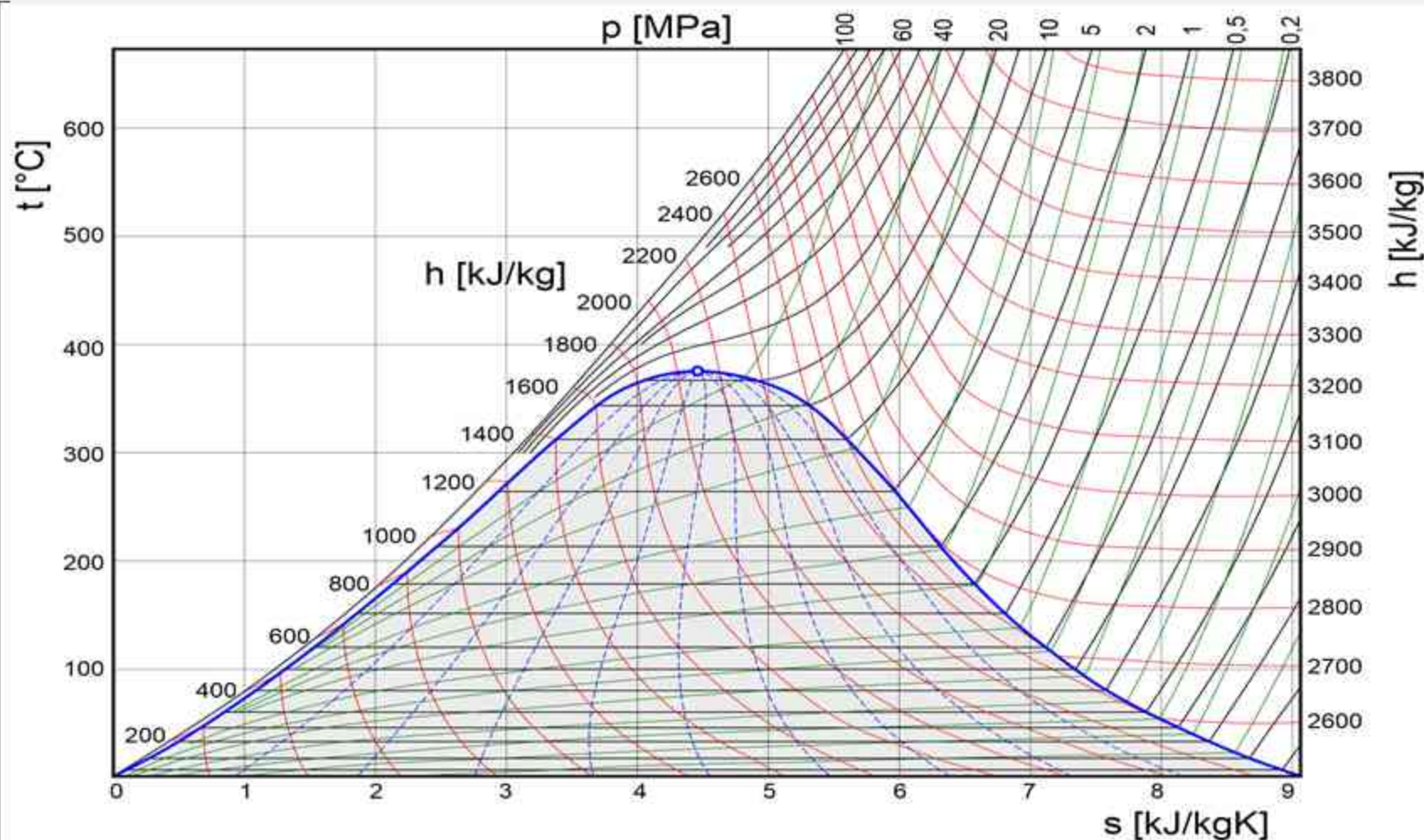
Trojný a kritický bod vody

Upraveno z obrázku na: Wikimedia Commons, Autor: Mpfiz



- p-T diagram se v energetice prakticky nepoužívá
- Důležitý je pouze kritický bod
- Podmínky blízké trojnému bodu se v energetice nevyskytují

T-s Diagram



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Kaboldy

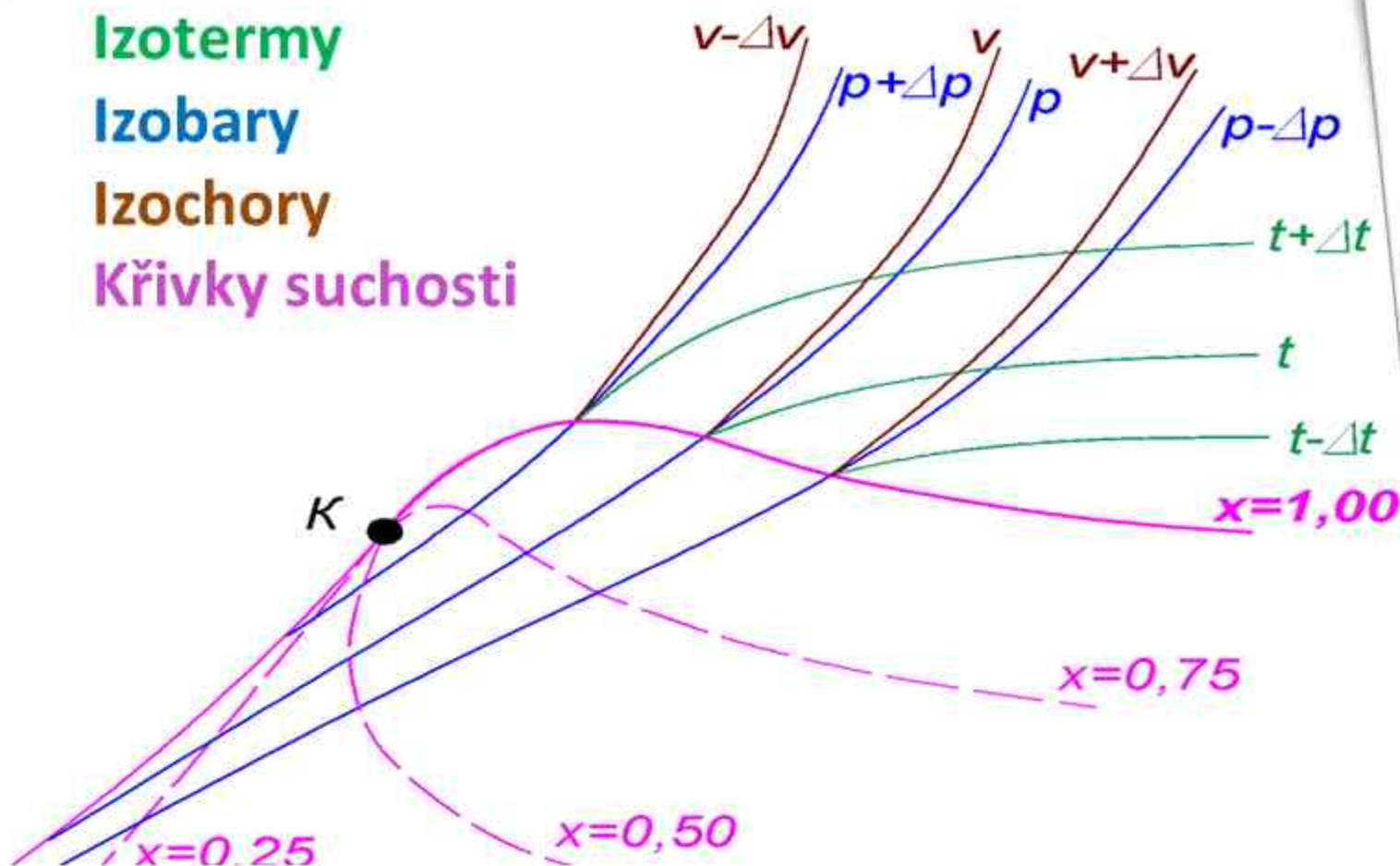
h-s diagram (Mollierův)

Izotermy

Izobary

Izochory

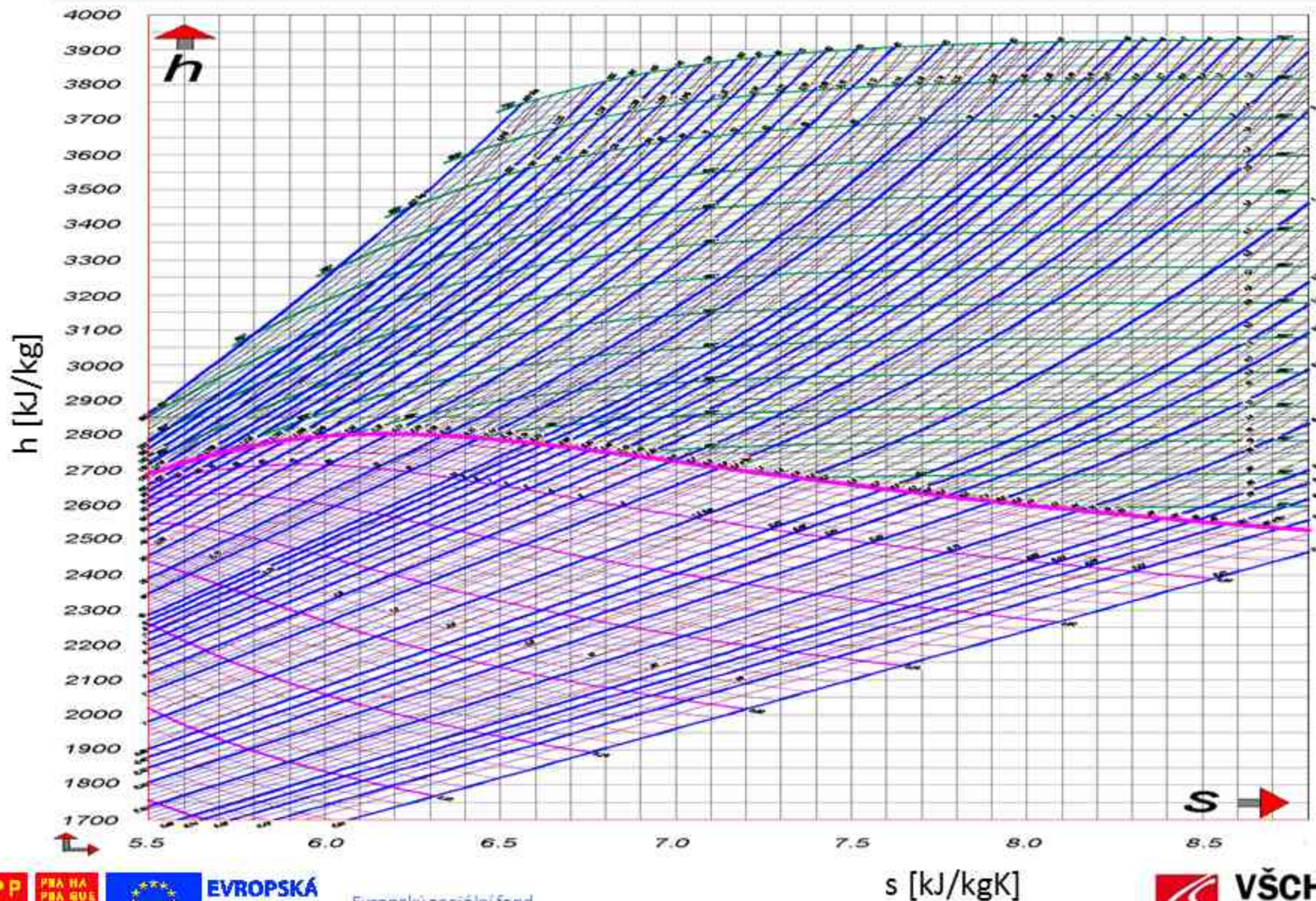
Křivky suchosti



Richard Mollier
(1863-1935)

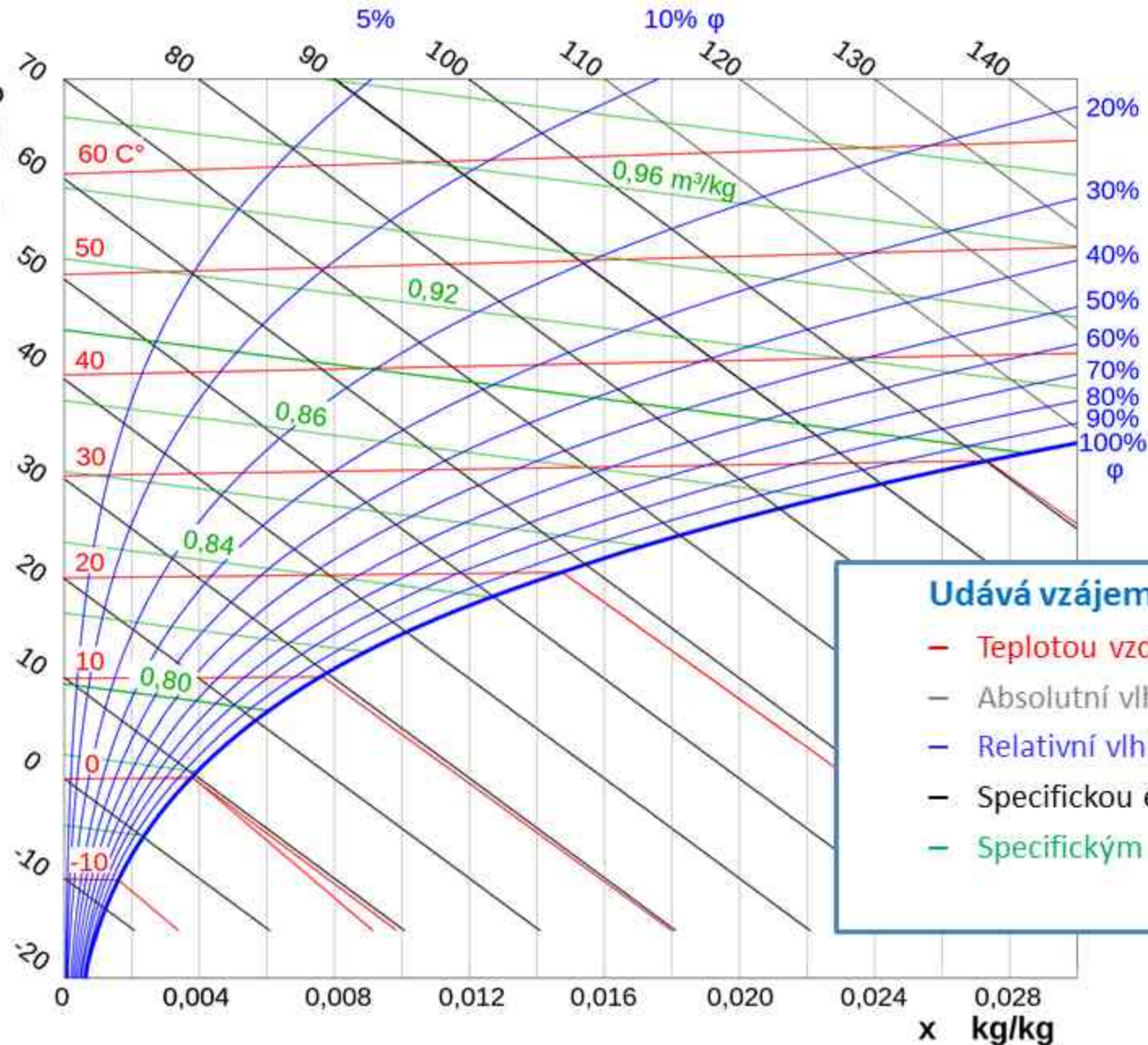
Zdroj obrázku: Wikimedia Commons,
Autor: Pretenderrr

h-s diagram horní mezní křivka



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Pretenders

h-x diagram



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Kaboldy

Historie termodynamiky

- **Velice úzce spjatá s parou**, která byla a je hlavním pracovním médiem
- První parní stroj – **Heronův hrnec**
- **18. století** – Newcomenův a Wattův **parní stroj**
- **19. století** rozvoj parních strojů vstoupilo do obecného povědomí jako **století páry** i díky filmu „*Marečku, podejte mi pero!*“ (1976)
- Rozvoj parních strojů vedl k snahám o jejich **termodynamický popis Carnot a Clapeyron**

Heron z Alexandrie rok. 10-70

- Heronův hrnec (Aeolipile)
- Parní stroj poháněný reaktivní silou

Vsuvka

Reaktivní síla vychází z 2. Newtonova zákona

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}$$

Neplatí zde zjednodušení

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = m \cancel{\frac{dv}{dt}}$$

Protože u reaktivního pohonu $m \neq \text{konst.}$



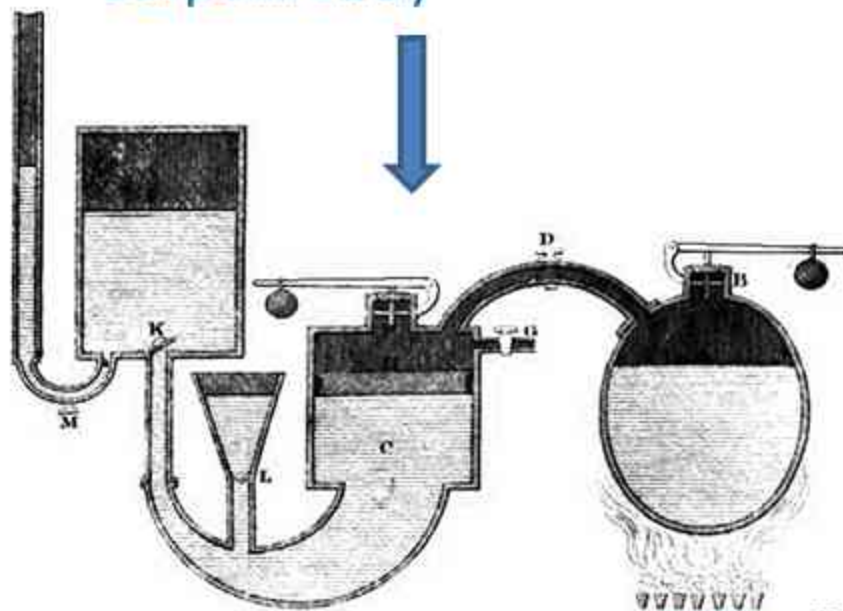
Zdroj obrázku: Wikimedia Commons

Denis Papin

1647-1712

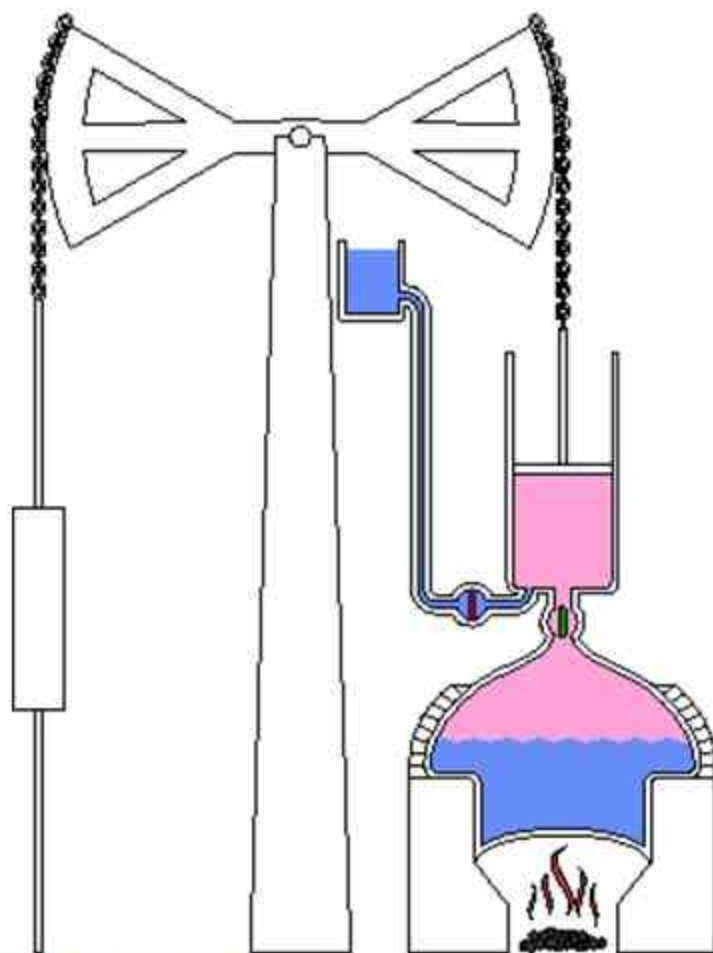


- Tlakový hrnec
- První pokusy s pístem poháněným parou
- Jednoduchý parní stroj pro čerpání vody



Thomas Newcomen 1664-1729

Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Emosopes



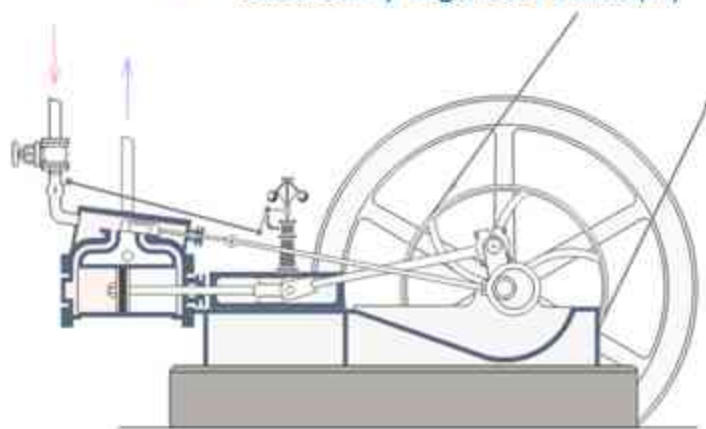
- Autor atmosférického parního stroje
- První cyklicky pracující parní stroj
- Kondenzace syté páry vstříknutím vody
- Použití např. jako pohon čerpadla

James Watt 1736-1819

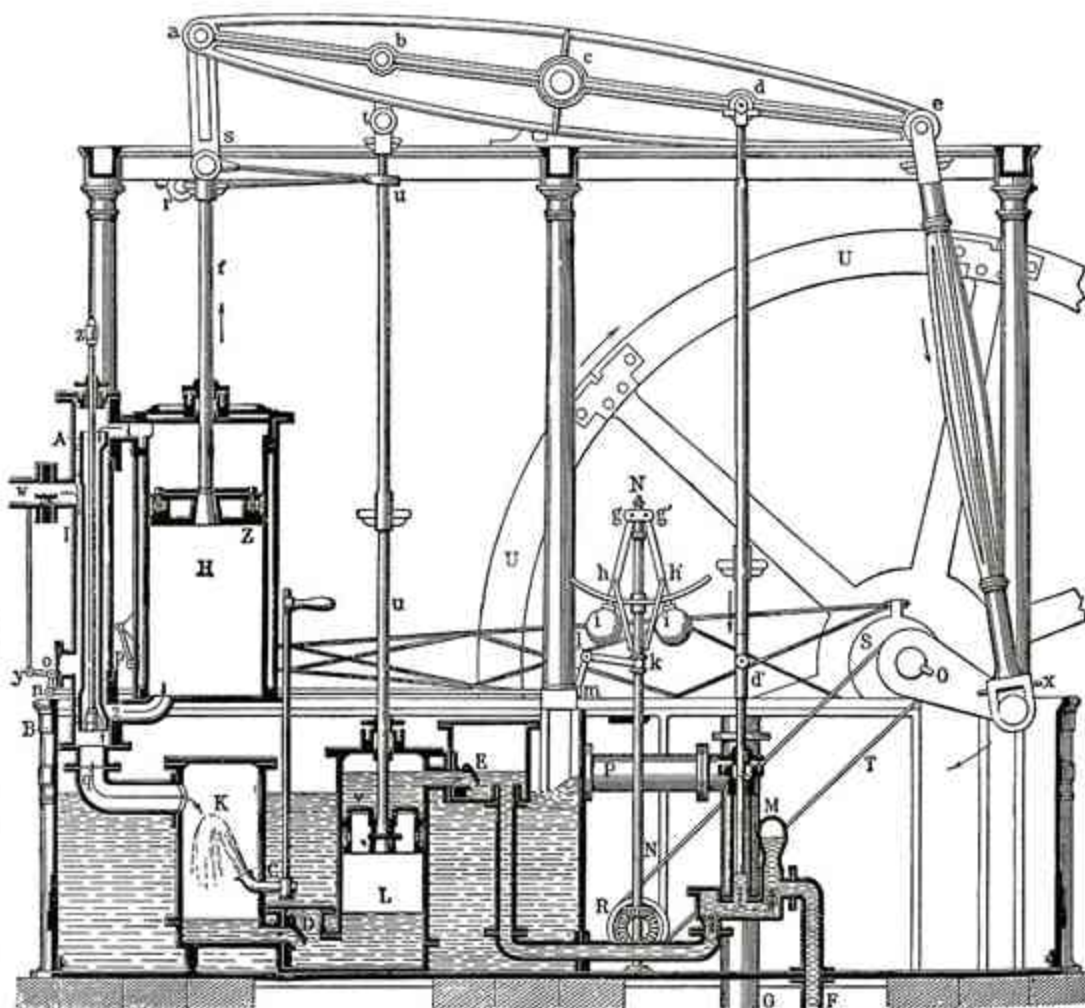
- Autor dvojčinného parního stroje
- Zdokonalil Newcomenův parní stroj

Pohon tlakem páry

- přepínání nátok páry do válce (H) šoupětem (A)
- kondenzátor (K)
- odstředivý regulátor tlaku (N)



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Panther

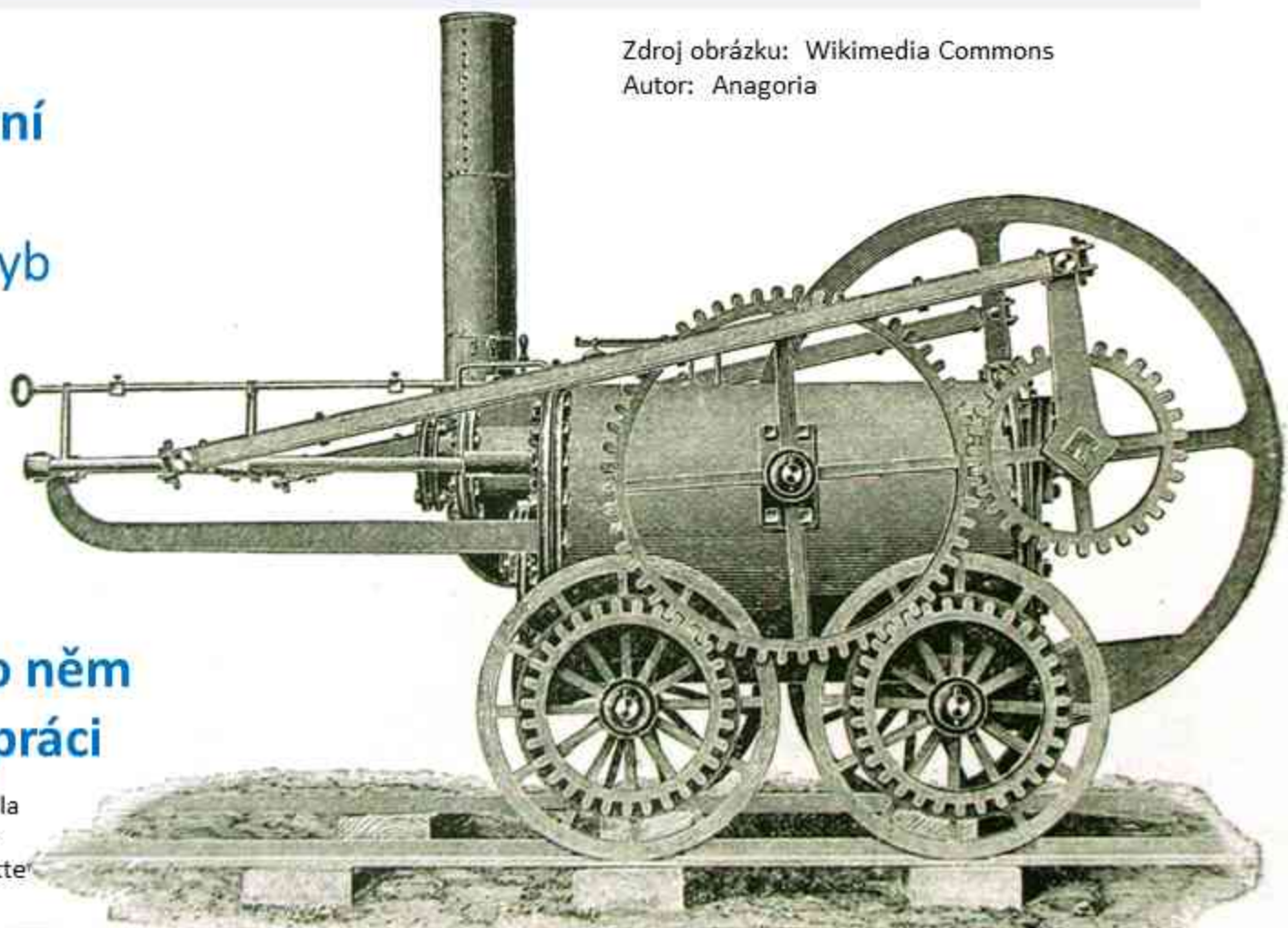


Zdroj obrázku a popisku: Wikimedia Commons

Richard Trevithick 1771-1833

- Trevithickův **vysokotlaký parní stroj** umožnil samostatný pohyb lokomotivy

Zdroj obrázku: Wikimedia Commons
Autor: Anagoria



- Sadi Carnot se o něm zmiňuje ve své práci

Carnot, Sadi (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris: Bachelier

Nicolas Leonard Sadi Carnot

1796-1832

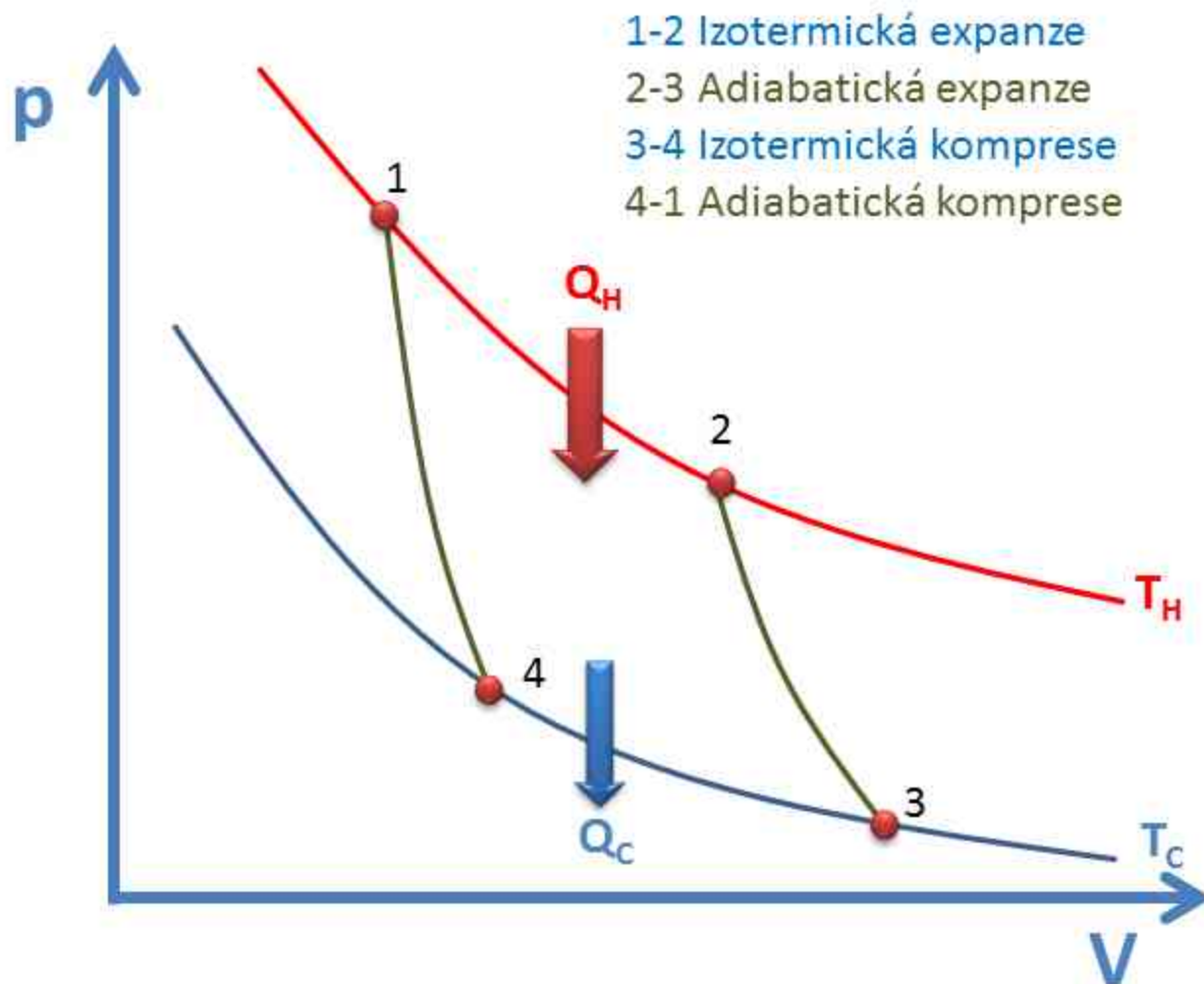
- Pokusil se formulovat základní pravidla fungování parního stroje ve svém díle „*Úvahy o hnací síle ohně a strojích vhodných pro rozvoj této síly*“
- Carnot, Sadi (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris: Bachelier
- Formuloval představu ideálního cyklicky pracujícího tepelného stroje cyklu, který odebírá práci převodem tepla z teplejšího zásobníku na chladnější
- Tuto myšlenku dále rozvinul a Benoît Clapeyron (viz dále)



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons

Zdroj obrázku: Wikimedia Commons

Carnotův cyklus v p-V diagramu



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons

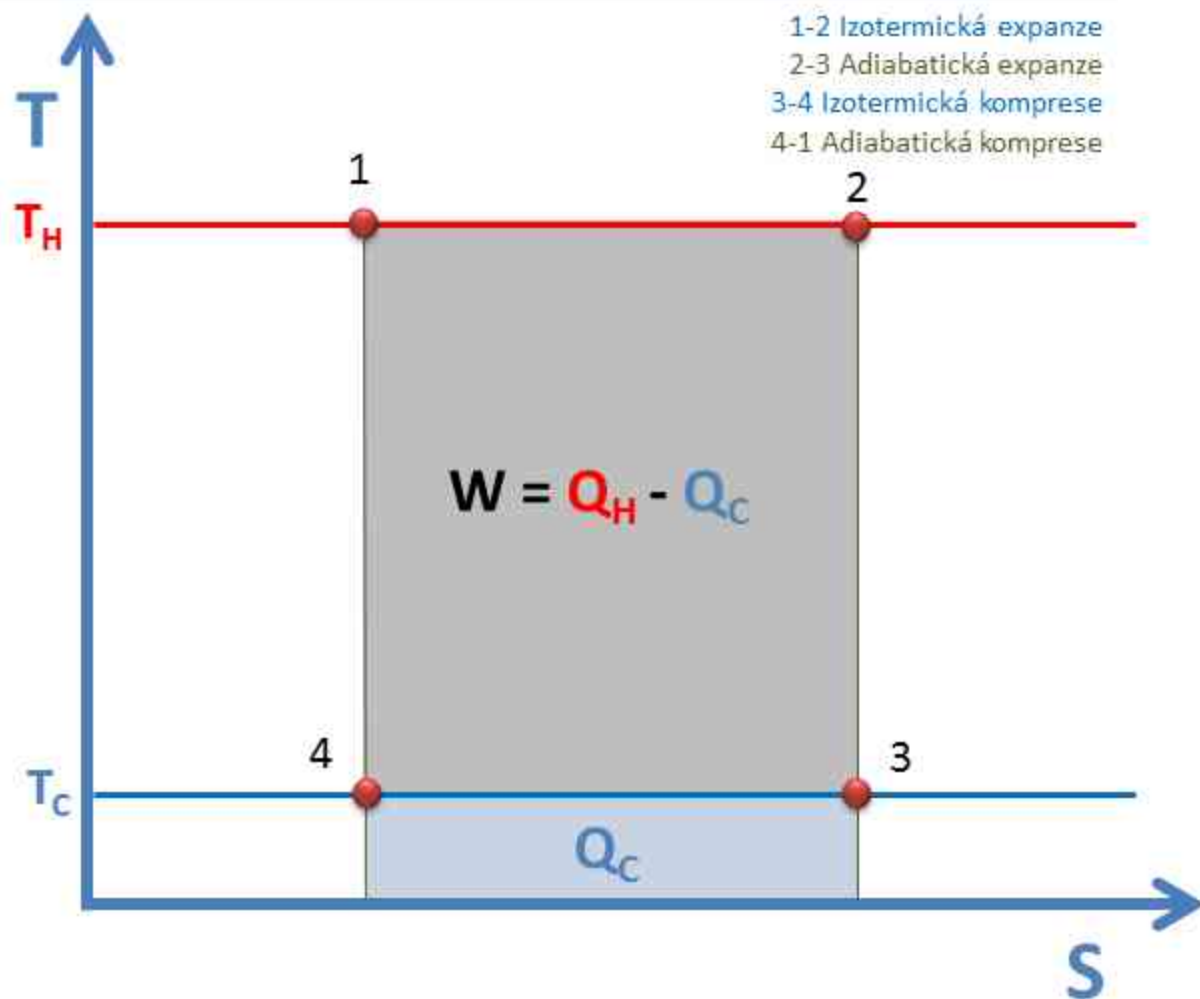
Benoît Clapeyron (1799-1864) rozvinul Carnotovu teorii a Carnotův cyklus graficky znázornil v p-V diagramu

Carnotův cyklus v T-s diagramu

- Učinnost Carnotova cyklu

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

- Carnotovu účinnost nemůže stroj pracující mezi dvěma danými teplotami překonat
- Snaha o zvýšení účinnosti Rankinova cyklu se nazývá „Carnotizace“



1. věta TD

$$dU = \delta Q + \delta W$$

$$dQ = m \cdot c_v \cdot dT + p \cdot dV$$

$$dQ = m \cdot c_p \cdot dT - V \cdot dp$$

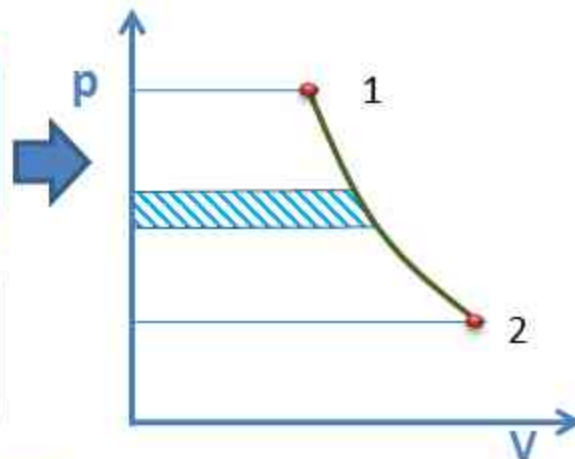
$$dQ = dH - W_t$$

Technická práce

$$W_t = \int_1^2 V \cdot dp$$

Objemová práce

$$W = - \int_1^2 p \cdot dV$$



Julius Robert
von Mayer (1814-1864)

Definoval vztah mezi specifickou tepelnou kapacitou ideálního plynu za konstantního tlaku a za konstantního objemu dnes nazýván Mayerův vztah

$$C_{p,m} = C_{v,m} + R$$

2. a 3. věta TD

- Vratný děj

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

- Nevratný děj

$$dS > \frac{\delta Q}{T}$$

Žádný cyklicky pracující tepelný stroj (např Rankinův cyklus) pracující mezi dvěma teplotami nemůže mít vyšší účinnost než Carnotův stroj (cyklus)

Nelze beze zbytku přeměnit teplo na práci

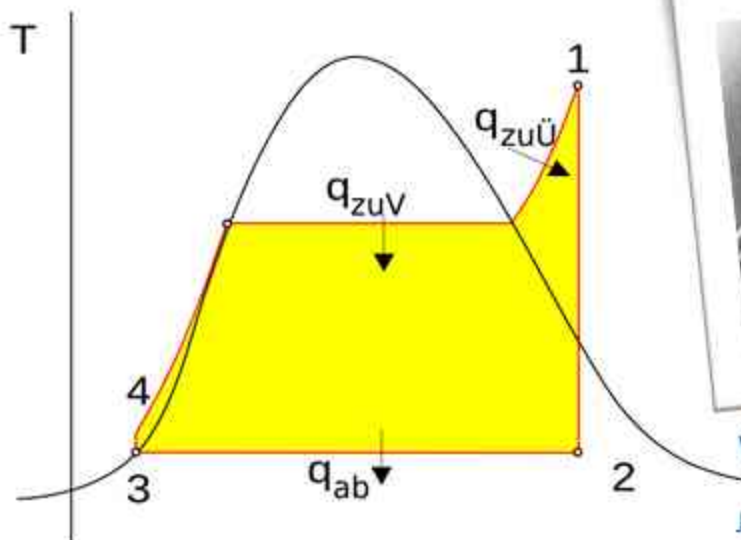
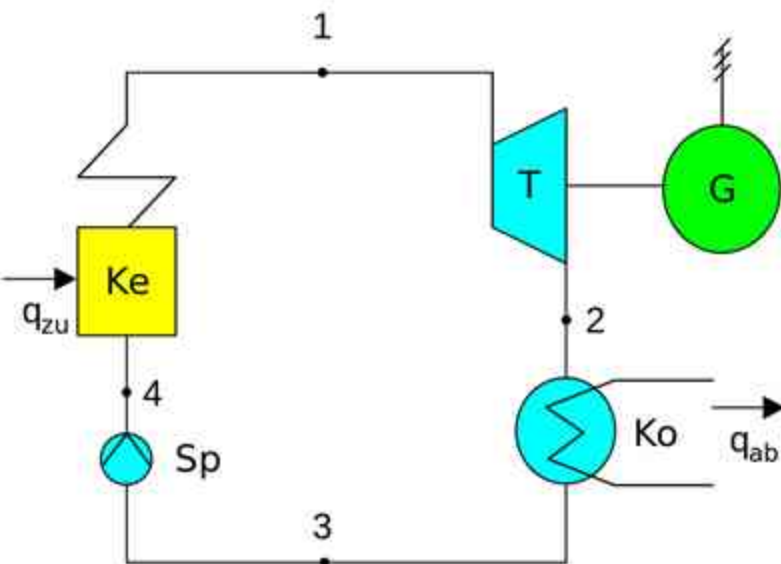
$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

Systém nelze konečným počtem kroků ochladit na teplotu 0 K

Špatné zprávy pro energetiky:

- Zvyšování účinnosti Rankinova cyklu je marnou snahou dosáhnout Carnotova ideálu
- Ani tento ideál nemůže dosáhnout 100 % účinnosti (3. věta TD)

Rankinův cyklus



W.J. Macquorn Rankine
(1820-1872)

Jeden z otců

Stermodynamiky, který
dal jméno Rankinovu
cyklu. U nás se někdy
nazývá Clausius-
Rankinův cyklus

Zdroj obrázků: Wikimedia Commons, Autor: Chris828

Rankinův cyklus je **reálný cyklus** který popisuje tepelnou elektrárnu.

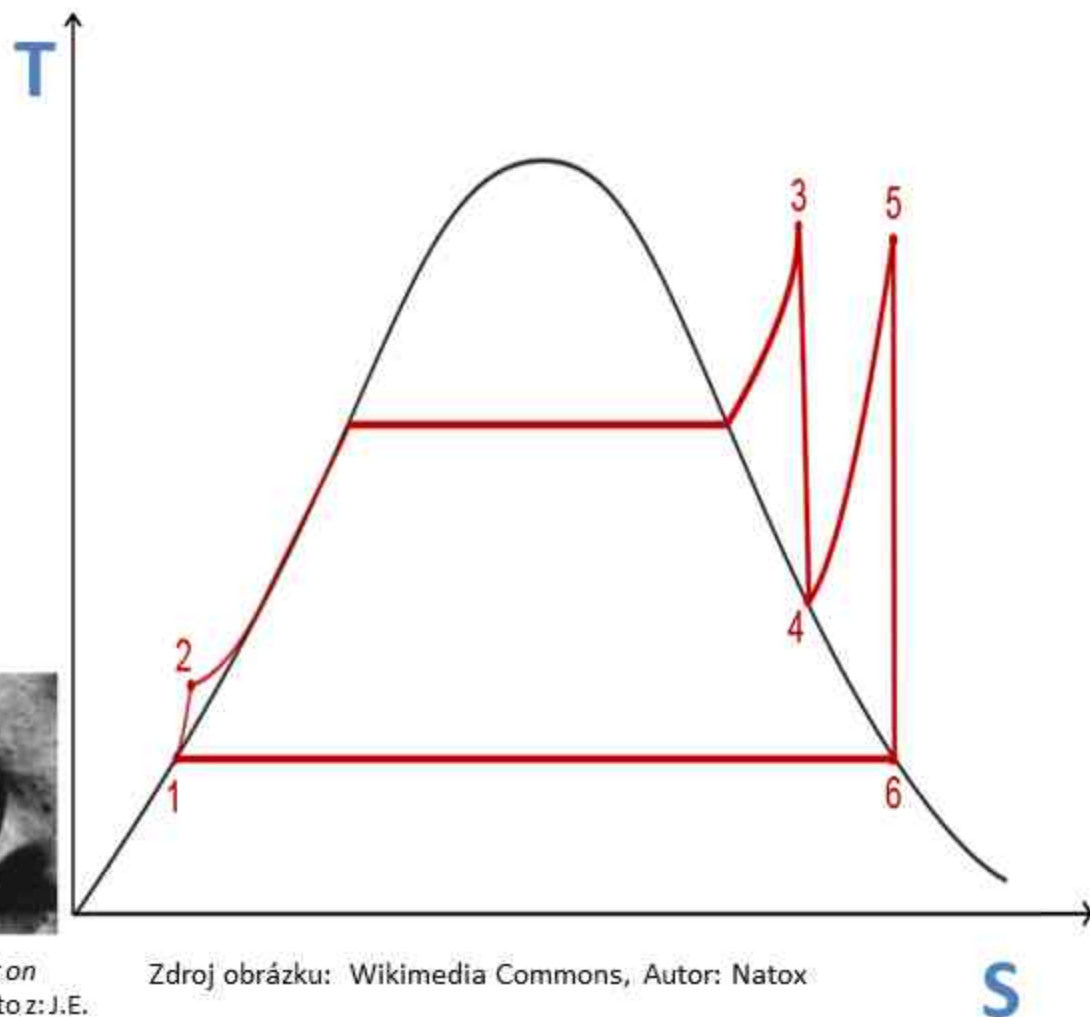
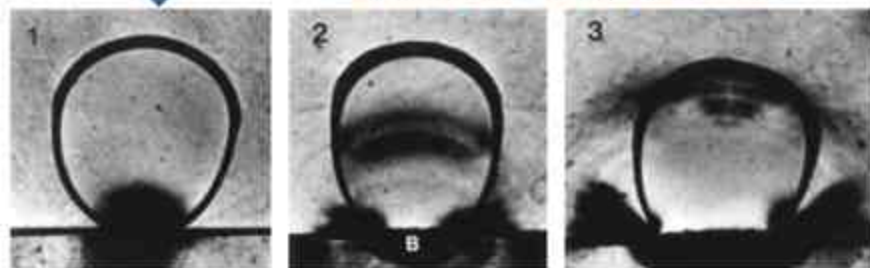
- Jeho účinnost je možno zvyšovat hlavně:
 - dosažením nadkritických parametrů páry (tlaku, teplota se dosahuje skoro vždy s výjimkou JE)
 - předehřevem vody na vyšší teplotu
 - mezipřihřátím páry (omezeně)

Mezipřihřátí páry

- Lze použít u klasických i jaderných elektráren
- Zvyšuje účinnost cyklu
- Mezipřihřátím páry lze vyřešit problém s kavitací



Impakt 2 mm kapky při 70 m/s

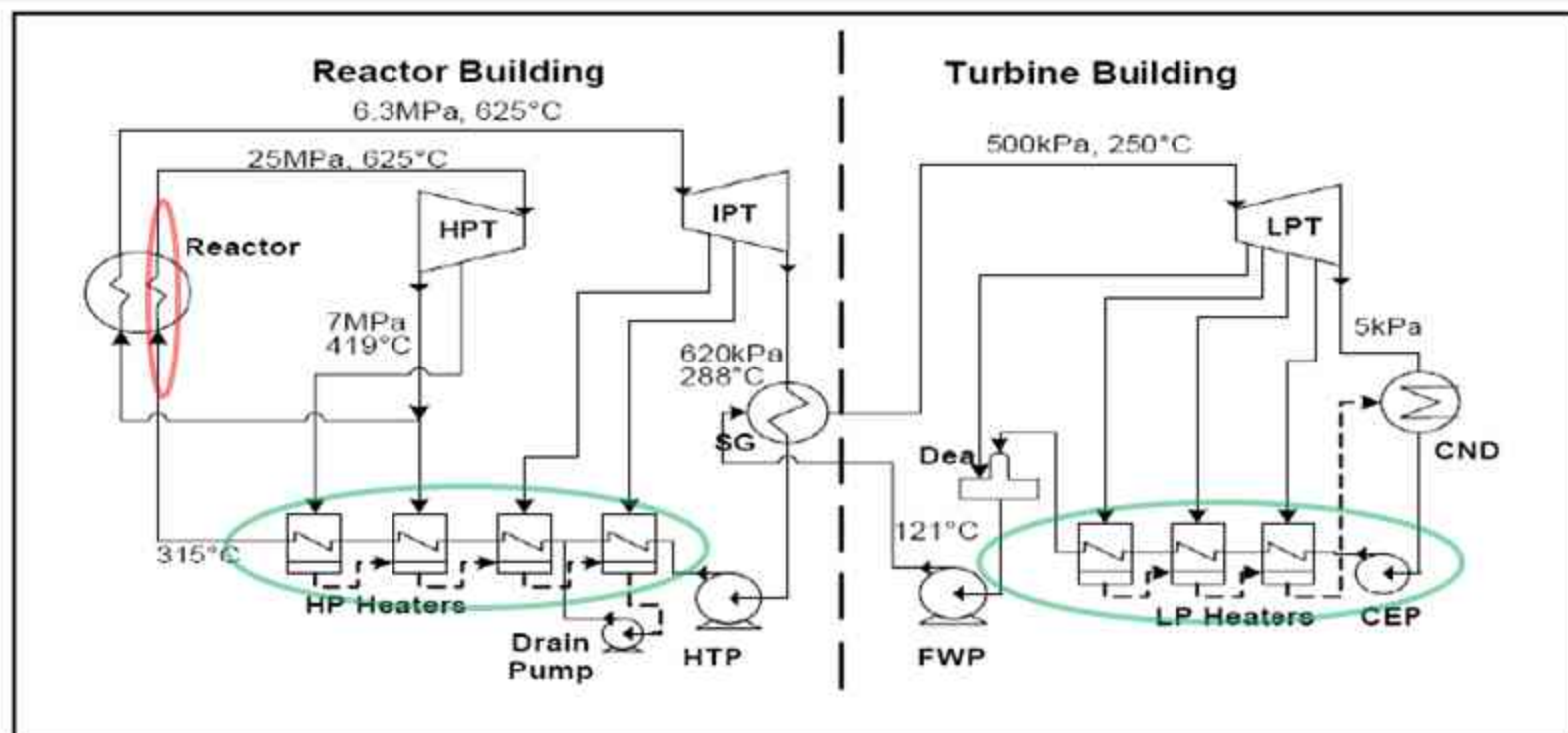


Zdroj obrázku: Camus J.J. *High-Speed Flow in Impact and its Effect on Solid Surfaces*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, 1971 Převzato z: J.E. Field et al. *Wear* (2012) vol. 290–291 p.154–160

Zdroj obrázku: Wikimedia Commons, Autor: Nattox

S

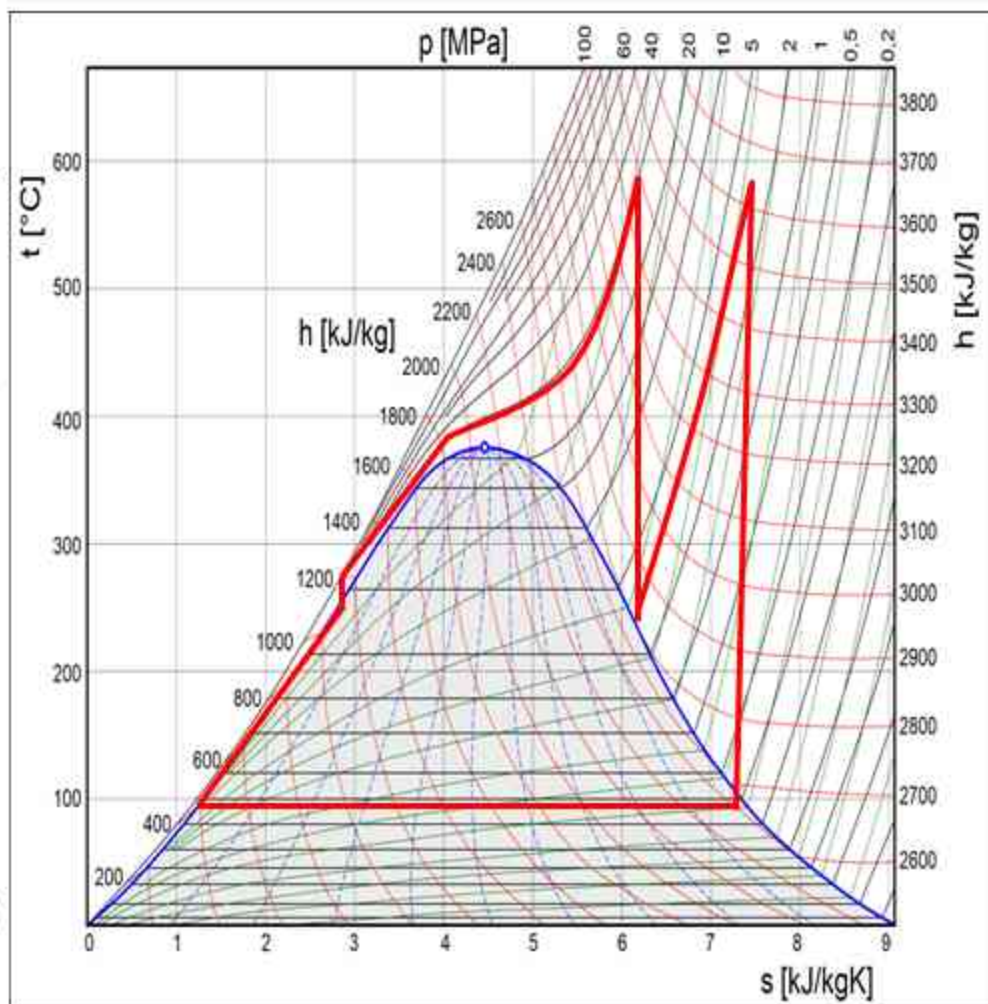
Mezipřihřátí a předehřev vody



Zdroj obrázku: Wikimedia Commons,
Autor: Fayyazsheikh1

- Kromě **mezipřihřátí**, je **předehřev** napájecí vody dalším řešením, které může zvýšit účinnost.
- Obrázek ukazuje oba způsoby na příkladu reaktoru CANDU (viz přednáška Jaderné elektrárny)

Nadkritické bloky



Pracovního tlak **nad 22,2 MPa**

U nás se staví nadkritický zdroj na Elektrárně Ledvice

660 MWe

28 MPa

600 $^{\circ}\text{C}$

(Přihřátá pára 5 MPa/610 $^{\circ}\text{C}$)

$\eta \sim 42,5\%$

data: Stamatelopoulos, G.-N. and Zelenka, P. *All for Power 2009* no. 3 p.25-26