

1. Kotle pro tepelné centrály

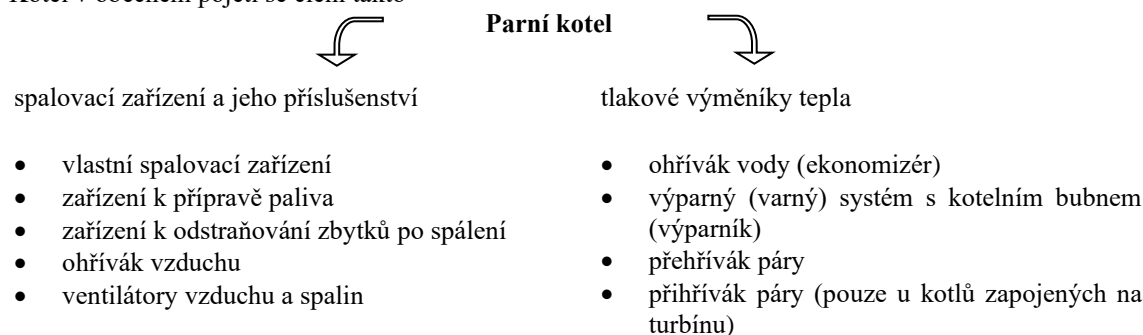
1.1. Základní pojmy

Kotel je zařízení sloužící k výrobě páry (parní kotel), ohřevu vody (teplovodní nebo horkovodní kotel) resp. k ohřevu jiného média (např. oleje).

Teplu se získává obvykle spalováním paliva tj. hmoty, ze které uvolňujeme chemickou reakcí teplo. V některých zvláštních případech odpadá spalování a k ohřevu média se využívá odpadního tepla (kotle utilizační) nebo elektřiny (elektrokotle).

V kotli tedy dochází k transformaci chemické energie paliva na tepelnou energii spalin do pracovního média. Výsledkem je pára (sytá nebo přehřátá), teplá voda (do 110 °C) resp. horká voda (nad 110 °C) požadovaného tlaku.

Kotel v obecném pojetí se člení takto



U parních kotlů se tlakové výměníky tepla nazývají parní generátory. U kotlů horkovodních a teplovodních je jediným výměníkem ohřívák vody.

Schéma jednoduššího kotle s vyznačením základních pojmů je v obr.

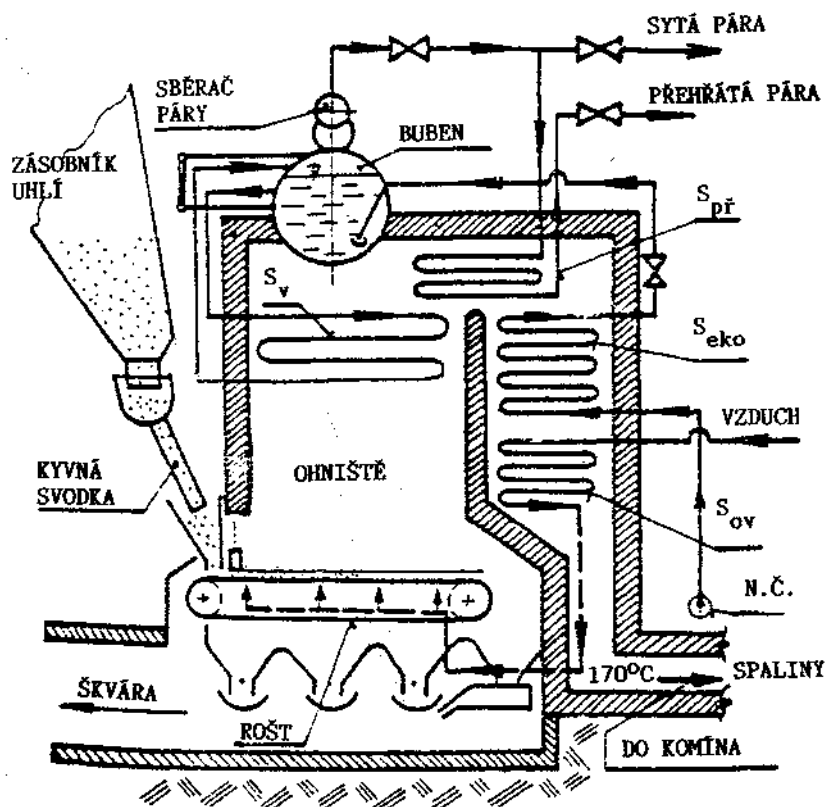
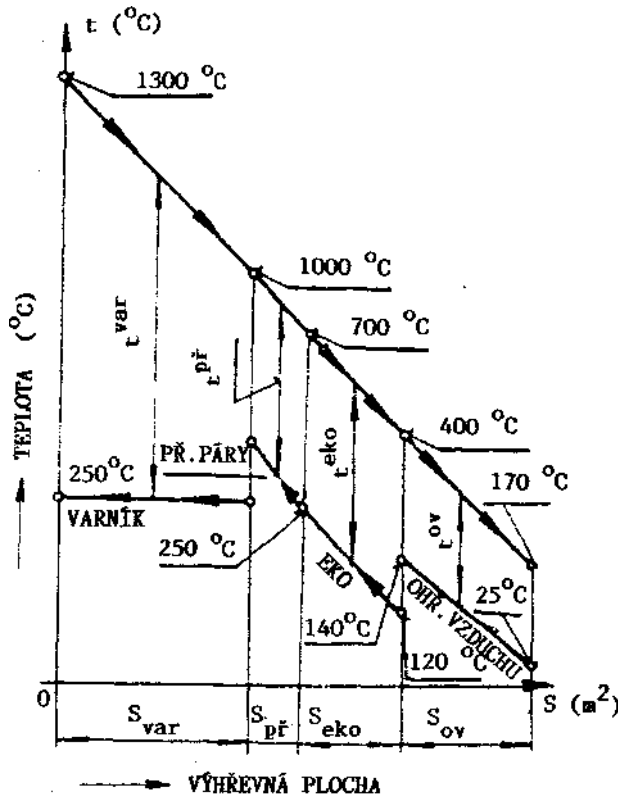


Schéma roštového kotle

Spalovací zařízení je zde tvořeno roštem, na němž hoří palivo. Prostor mezi roštem a první teplosměnnou plochou se nazývá ohniště resp. spalovací komora. Příslušenství spalovacího zařízení zde tvoří doprava vzduchu, ohřívák vzduchu (S_{ov}) a systém odvodu spalin a škváry

Parní generátor je tvořen třemi typy výměníků. Voda z úpravy vody je stlačena napájecím čerpadlem (NČ) a prochází přes ohřívák vody (S_{eko}) do bubnu. Z bubnu pak vstupuje do výparníku (S_v), kde se ohřívá a jde zpět do bubnu. V bubnu dochází k oddělování syté páry od vody. Sytá pára z bubnu jde do přehříváku ($S_{př}$), kde se mění ve výsledný produkt - přehřátou páru.

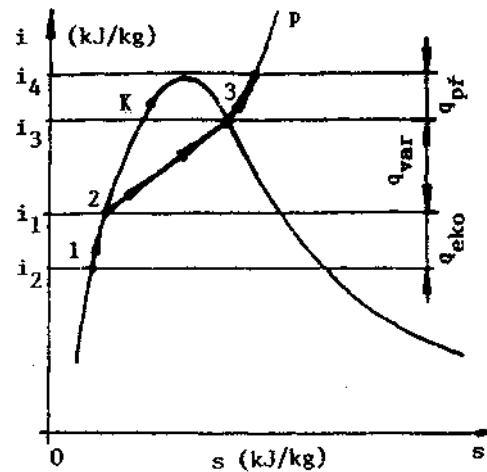
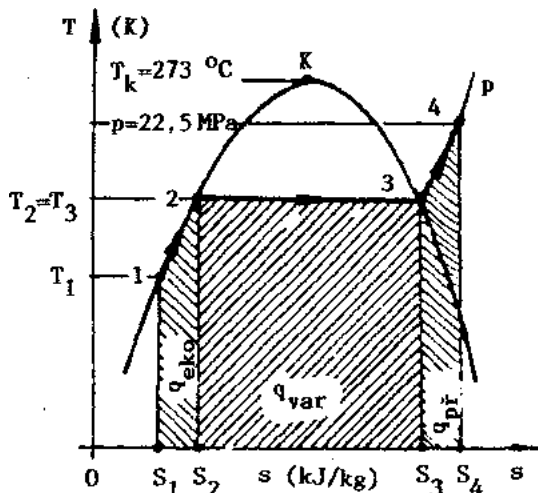
Spaliny, vznikající spalováním uhlí v ohništi odcházejí přes S_v nahoru (1. tah kotle), procházejí vodorovným spalinovodem (mezitah) a obracejí se a proudí směrem dolů (2. tah kotle). Kotel tohoto provedení, z hlediska proudění spalin, se označuje jako dvoutahový. Kromě toho mohou být kotle jednotahové, třítahové i vícetahové.



1.2. Diagram teplota - výhřevná plocha

Diagram zachycuje průběh teploty spalin a media (voda- pára) a spalovacího vzduchu. Z obr. je patrný postupný úbytek teploty spalin v kotli z 1300 °C na 170 °C v důsledku odvodu tepla do výhřevných ploch kotle. Všechny výměníky tepla jsou protiproudé. Spalovací vzduch se ohřívá z 25 °C na 140 °C v ohříváku vzduchu. Napájecí voda se ohřívá ze 120 °C teoreticky až k teplotě varu při daném tlaku v EKO a je vedena do bubnu. Teplota v bubnu jakožto i v celém výparníku je konstantní odpovídající mezi sytosti (isobaricko-isotermický proces). V důsledku přívodu tepla do výparníku se voda z části mění v sytou páru. Podíl vyrobené páry je charakterizován suchostí parovodní směsi x . V bubnu dochází k oddělení syté vody a páry. Voda se vrací do výparníku, pára se ohřívá v přehříváku, kde se zvyšuje její teplota oproti mezi sytosti o cca 30 °C.

Základní změny stavu vody a páry v kotli znázorněné v diagramu T-s a i-s jsou patrné z následujících obrázků.



q_{eko} - teplo do ekonomizéru (ohřátí napájecí vody do teploty varu)

q_{var} - teplo do výparníku (na vypaření napájecí vody)

$q_{př}$ - teplo do přehříváku (na přehřátí syté páry ze stavu 3 na stav 4)

Pořadí ploch ve směru toku spalin

výparník - přehřívák - ohřívák vody (EKO) - ohřívák vzduchu (LUVO)

Pořadí ploch ve směru toku media (vody, páry)

ohřívák vody (EKO) - výparník - přehřívák

1.3. Rozdělení kotlů

Podle užití v energetické centrále rozeznáváme kotle elektrárenské, teplárenské, výtopenké, kotle pro spalovny, kotle ulitizační (na odpadní teplo), pro dopravní účely (lodní, lokomotivní).

Nejčastější jsou stacionární, řídicí mobilní. Zvláštní skupinu tvoří kotle balené.

Podle použitého paliva rozeznáváme kotle na tuhá, kapalná a plynná paliva resp. pro jejich společné spalování.

Podle způsobu spalování tuhých paliv rozeznáváme kotle roštové, fluidní, práškové (granulační nebo výtavné) a cyklonové.

Podle konstrukce výparníku jsou kotle velkoprostorové (s relativně velkým obsahem vody bez cirkulace) a vodotrubné (s relativně malým obsahem vody s cirkulací vody ve výparníku).

Podle tlaku se kotle dělí parní kotle na:

- nízkotlakové do 2,5 MPa tlaku vyrobené páry
- středotlakové od 2,5 do 6,4 MPa tlaku vyrobené páry
- vysokotlakové od 6,4 MPa výše tlaku vyrobené páry

Podle způsobu zatížení rozeznáváme kotle špičkové, pološpičkové a základní.

1.4. Parametry kotlů

Kotel je charakterizován souborem těchto údajů:

- jmenovitý hmotnostní tok vyrobené páry na výstupu z kotle, kterého musí kotel dosáhnout v trvalém provozu při dodržení jmenovitých hodnot základních parametrů tj. tlaku a teploty páry a napájecí vody při spalování projektovaného paliva,
- jmenovitý tlak,
- jmenovitá teplota páry (přehřáté i přihřáté),
- jmenovitá teplota napájecí vody
- druh a vlastností paliva.

Příklad označení parního kotle

FLUIDNÍ KOTEL PARNÍ

| | | | |
|---|--|---|-----------------------------------|
| 175 kg/s (630 t/h) hmotnostní tok páry | 17,8/3,8 MPa tlak přehřáté/přihřáté páry | 540/545 °C teplota přehřáté/přihřáté páry | 240 °C teplota napájecí vody |
| na hnědé uhlí | 15MJ/kg výhřevnost | obsahem W=25% obsah vody v palivu | A=15% obsah popelovin v palivu |

U horkovodního kotle dochází pouze k ohřevu vody. Příklad označení :

HORKOVODNÍ KOTEL na zemní plyn

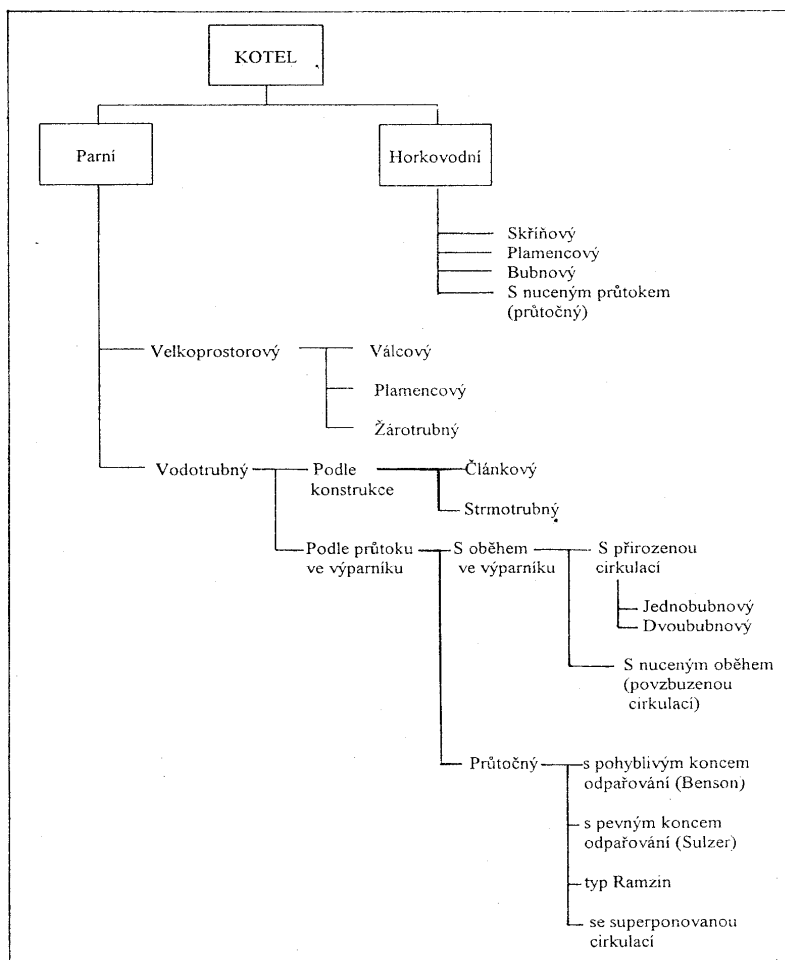
| | | | |
|--|--|----------------------|---------------|
| 198 kg/s (715 t/h) hmotnostní průtok vody | 150/90 °C výstupní/vstupní teplota vody | 1,5 MPa tlak vody | na zemní plyn |
|--|--|----------------------|---------------|

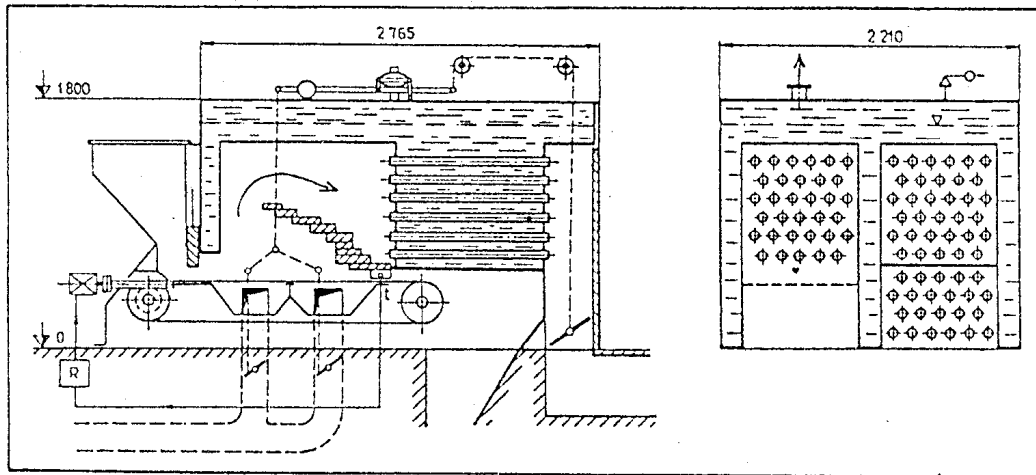
2. Dělení kotlů podle výstupního média a provedení výparníku

Pokud je pracovním médiem v kotli voda, pak kotel může dodávat buď horkou vodu nebo páru. Horkovodní kotle jsou, dá se říci, v podstatě modifikované některé typy parních kotlů tak, že se u nich vynechal výparník a přehřívák páry. Kotel je tedy proveden pouze jako ohřívák vody vyrábějící horkou vodu o tlaku vyšším než 0,1 MPa a teplotě vyšší než 115°C. Parní kotel se podle tlaku páry staví s podkritickými parametry (tlak nižší než 225,6 bar, teplota většinou do 540°C) nebo s nadkritickými parametry (tlak vyšší než 225,6 bar a teplota dnes cca do 580°C).

Kotel horkovodní

Skříňový - s roštovým ohništěm je na obr. 2.8. Používá se pro menší výkony a tlaky. Ohniště je uspořádáno přímo v tělese kotle, spaliny proudí přes žárové trubky (uspořádané např. ve 3 tazích) do komína.

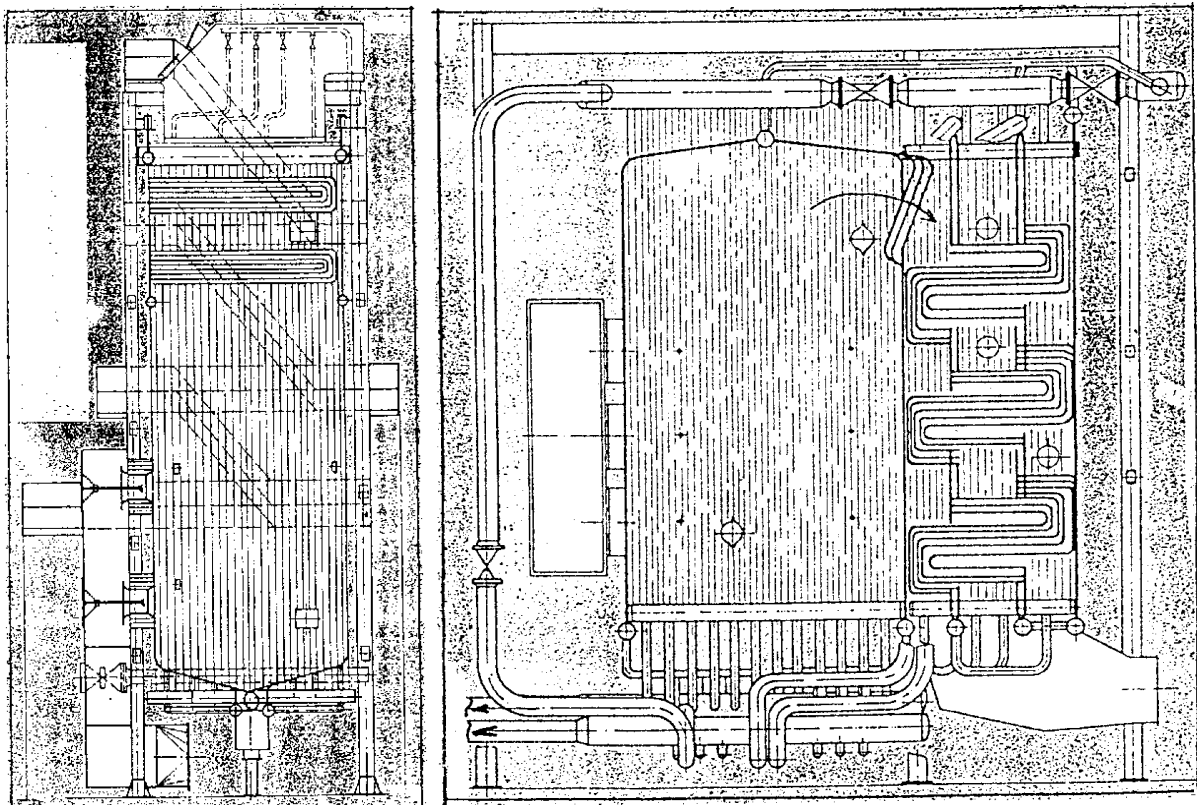




Plamencový - je podobné konstrukce jako parní plamencový kotel. Běžně se pro větší výkony provádí v kombinaci se žárovými trubkami.

Bubnový - v provedení jako dvoububnový vodotrubný kotel je podobné konstrukce jako parní dvoububnový kotel. Kotel je konstruován jako samonosný a na stavenišť se přepravuje ve smontovaném stavu z výrobního závodu.

S nuceným průtokem (průtočný) - na spalování oleje nebo plynu ve věžovém nebo dvoutahovém provedení viz obr. Staví se pro největší výkony. **Věžový kotel** má nad ohništěm konvekční svazky vytvořené z trubkových hadů zapojených do trubek, které vytváří stěny kotle. Proudění v hadech je usměrněno přepážkami ve stěnové trubce. **Dvoutahový kotel** má první tah jako ohniště a ve druhém tahu je umístěn konvekční svazek. Tento je vytvořen z trubkových hadů tvořících panely (desky) a je uspořádán tak, že umožňuje oplach vodou.



Kotel parní

Parní kotle podle velikosti vodního obsahu můžeme rozdělit na kotle „velkoprostorové“ a kotle „vodotrubné“.

Velkoprostorové kotle vyznačují se velkým vodním obsahem a z toho vyplývajícím velkým akumulacním

číslem T_a , které je definováno jako poměr hmotnosti m_v [kg] kotelní vody a množství vyrobené páry M_p [kg · h⁻¹]

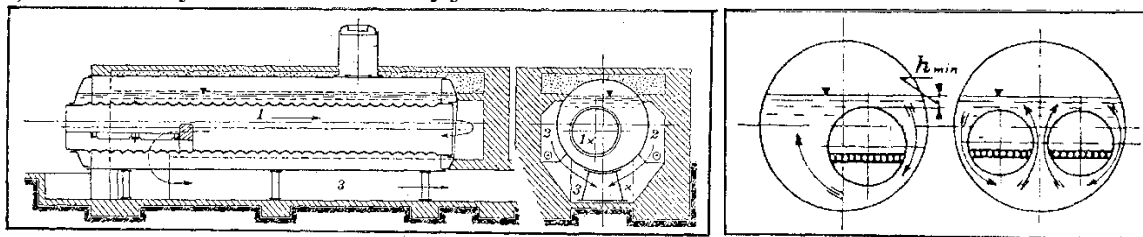
$$T_a = \frac{m_v}{M_p} \quad [\text{h}]$$

a bývá 8-10 h i větší. Protože bod varu vody v kotli je funkcí tlaku, tak při každé změně tlaku v kotli se mění i teplota bodu varu vody a tím se změní i množství páry uvolněné z vodního obsahu kotle. Množství uvolněné syté páry m_p z vodního obsahu kotle m_v při poklesu tlaku ze stavu „1“ na stav „2“ lze stanovit z tepelné bilance.

Za výhody velkoprostorového kotle lze počítat především malé kolísání tlaku při změnách odběru páry (velké akumulační číslo) a necitlivost na kvalitu napájecí vody (vytvořený kotelní kámen se čas od času ze stěny oklepal).

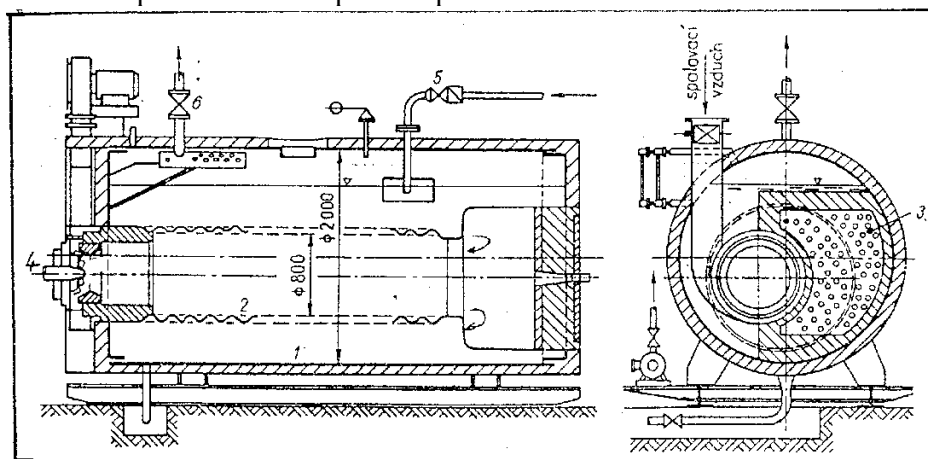
Za nevýhody lze především považovat malou výkonnost, nízký pracovní tlak a pomalé najíždění (velký vodní obsah). Pro ilustraci jsou dále uvedeny tři základní typy velkoprostorových kotlů.

a) Plamencový kotel - schematicky je znázorněn na obr.



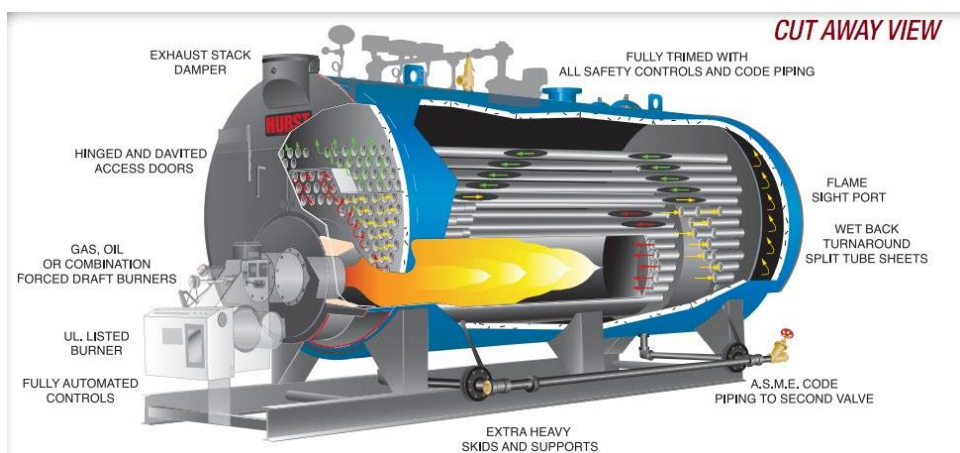
Plameneč je bezešvá zvlněná roura umístěná uvnitř válcového pláště kotle, v níž je uspořádáno roštové ohniště nebo plynový či olejový hořák. Prstencové vlny na plamenci jej vyztužují proti namáhání vnějším přetlakem kotelní vody a zajišťují i jeho potřebnou podélnou pružnost vzhledem k rozdílné teplotě plamence a pláště kotle. Pokud má kotel jen jeden plameneč, pak tento je umístěn mimo osu kotle, aby se zlepšila cirkulace vody a usnadnilo čištění kotle. Nejčastěji se staví kotle se dvěma plamenci. Nejnižší hladina vody musí být vždy dostatečně nad plamencem. Směr proudění spalin je vyznačen na obrázku. Plamencem 1 protékají spaliny od ohniště na jeho konec, pak se obracejí a průduchy 2 po bocích pláště proudí dopředu a průduchem 3 pod pláštěm opět dozadu kotle a do komína. Dnes se tento typ plamencového kotle již nestaví.

Žárotrubný kotel. Dnes se staví žárotrubné kotle v kombinaci s plamencem. Schéma možného provedení je na obrázku. Uvnitř válce pod vodní hladinou jsou uspořádány podélné trubky zaválcované do obou den válce, kterými proudí spaliny vystupující z plamence zpět k přední části kotle, zde se obrací a po bocích válce proudí zpět k zadní části kotle a do komína.



V bubnu 1 kotle je umístěn plameneč 2 a dvě skupiny žárových trubek 3. V přední části plamence 2 je zabudovaný plynový (olejový) hořák 4. Spaliny po průchodu plamencem se otočí a první skupinou žárových trubek 3 proudí směrem k přední části kotle 1, kde se opět obrátí a druhou skupinou žárových trubek 3 proudí k zadní části kotle a do komína.

Soudobé provedení kombinovaného kotle (plameneč, žárové trubky) je na obr. v provedení jako balený kotel.



Vodotrubný kotel umožňuje stavbu kotlů od nejmenších výkonů až po nejvyšší výkon. Pracovní tlak a teplotu páry lze volit od barometrického tlaku až po parametry nadkritické. Tyto kotle lze stavět s ohništi všech typů na kvalitní i méně hodnotná paliva včetně odpadů. Mají nízké akumulaci číslo (řádově 101 min) a proto jsou citlivé na změny odběru páry v souvislosti s udržením požadovaného konstantního tlaku páry. Na druhé straně zmenšenému vodnímu obsahu kotle odpovídá rychlejší najíždění. Vodotrubných kotlů v průběhu jejich vývoje vznikla celá řada různých typů a provedení. Pro představu jsou dále uvedeny jen základní charakteristické typy vodotrubných kotlů.

Podle způsobu proudění vody ve výparníku lze tyto kotle dělit na:

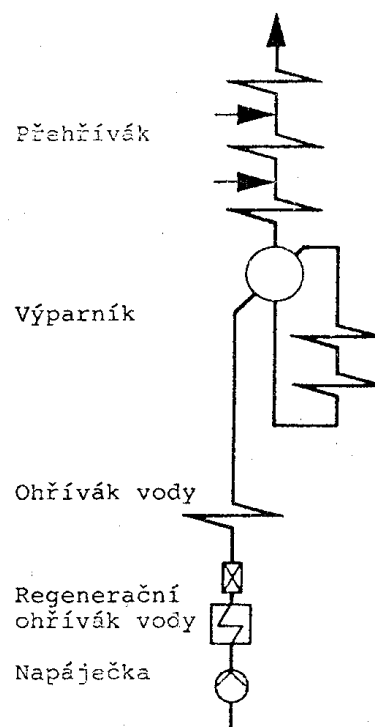
Kotel s přirozenou cirkulací

má potřebný přítok vody do jednotlivých trubek výparníku zajištěn tzv. přirozeným oběhem, který je vyvolán rozdílnou hustotou vody a parovodní směsí v systému výparníku. Při jednom oběhu vody výparníkem se odpaří jen část vody, takže do bubnu z varnic vstupuje mokrá pára (parovodní směs) o suchosti „x“, což je obsah syté páry v 1 kg parovodní směsi. (Suchá sytá pára má $x = 1$, sytá voda má $x = 0$) Oběh vody výparníkem je charakterizován oběhovým číslem „O“, které je (za určitých zjednodušujících předpokladů) definováno jako převrácená hodnota suchosti „x“ na výstupu z varnic. Nebo lze též oběhové číslo definovat jako poměr hmotového průtoku vody vstupující do varnice k hmotovému průtoku syté páry vyrobené výparníkem. Schéma takového systému kotle s přirozenou cirkulací je na obr.

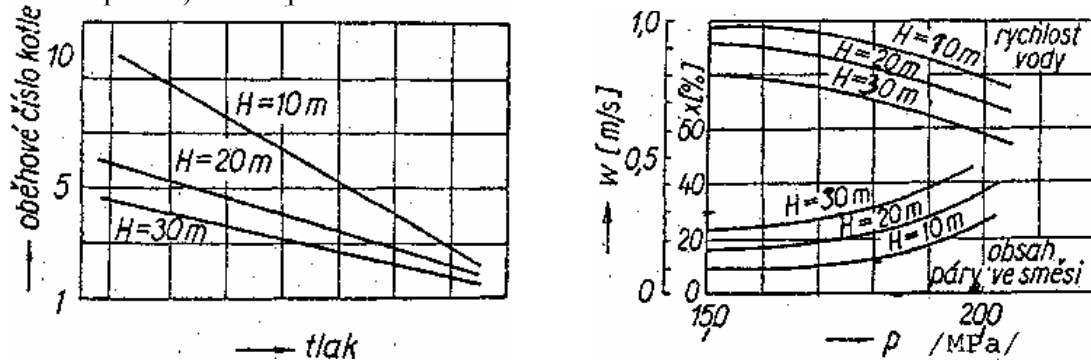
Charakteristický pro tento kotel je výparník s pevným koncem odpařování. (Pevný konec odpařování je konstrukčně realizován bubnem kotle.) Tzn. že výparník má konstantní velikost teplosměnné plochy, což se musí zohlednit při návrhu kotle a jeho regulaci. Ve vodní části bubnu parního kotle dochází k zahušťování solí obsažených v obíhající kotelní vodě. Aby se dodržela potřebná kvalita páry (usazování solí v přehříváku a v turbíně) musí se obsah solí v kotelní vodě udržovat na přípustné hodnotě. Provádí se to odpouštěním části kotelní vody z místa jejího maximálního zahuštění solemi. Odpouštěná část zahuštěné kotelní vody se nazývá odluh a odebírá se těsně pod hladinou vody v bubnu. Kotel s přirozenou cirkulací tedy dokáže zajistit kvalitu páry i při horší kvalitě napájecí vody. Dalším typickým znakem tohoto kotle je připojení ohříváku vody přímo na buben kotle a dále to, že do varnic vstupuje voda z bubnu na bodě varu při $x = 0$.

Kotel s nuceným oběhem (povzbuzenou cirkulací)

S rostoucím tlakem vyráběné páry se zmenšuje rozdíl hustoty vody a syté páry, jenž způsobuje přirozenou cirkulaci ve varnicích. Proto se oběhové číslo výparníku s rostoucím tlakem snižuje. Je tím menší, čím je větší výška výparníku (pokud výparník tvoří stěny ohniště). To je způsobeno tím, že s rostoucí výškou výparníku roste jeho parní výkonnost, (suchost "x") rychleji než rychlost vody



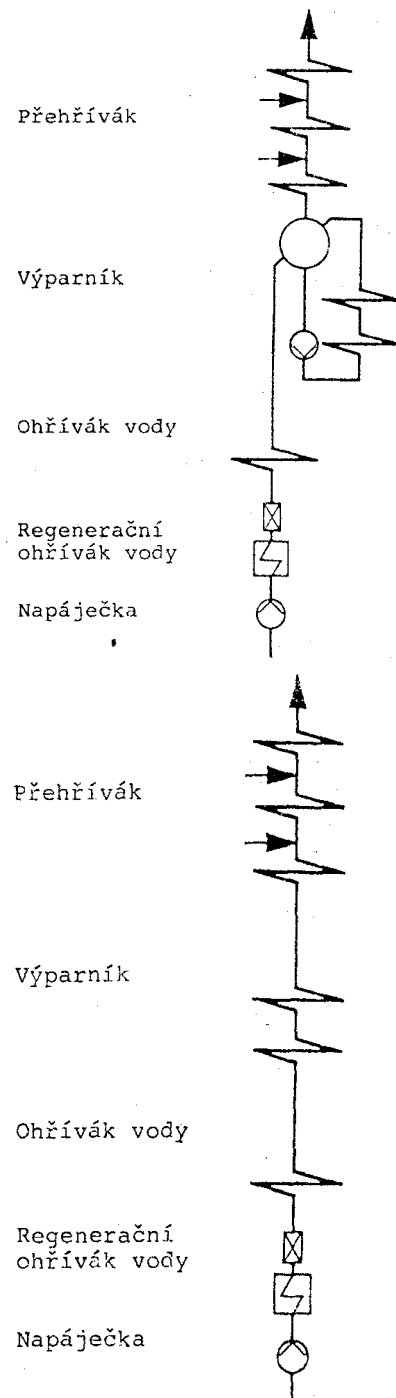
(hmotnostní průtok) na vstupu do varnic.



S rostoucím tlakem a s rostoucí výškou se zvyšuje obsah páry "x" ve směsi a snižuje se rychlost vody (oběhové číslo). Použití výparníku s přirozeným oběhem je tedy omezeno tlakem. Za provozně ověřený tlak při spolehlivé funkci výparníku se považuje tlak kolem 14,0 MPa. Kotle na vyšší tlak s přirozeným oběhem se staví výjimečně. Při takovém tlaku, zvláště u kotlů s velkým výkonem, vychází již tloušťka stěny bubnu příliš velká, dá se říci na hranici výrobních možností. K poruchám výparníku s přirozeným oběhem docházelo i u kotlů s měnicím se zatížením a u kotlů s malou stavební výškou, typickým příkladem jsou např. kotle pro využívání tepla odpadních spalin. Stabilní funkci výparníku i v oblasti vyšších tlaků, řekněme do cca 18 MPa, nebo i při specifických provozních podmínkách, lze zajistit při nuceném oběhu, který je vyvolán oběhovým čerpadlem. Protože výparník s nuceným oběhem může být proveden z trubek menšího průměru (oběhové čerpadlo kryje větší tlakové ztráty) než u přirozené cirkulace, bývá i jeho akumulací číslo menší, cca 0,2. Schéma kotle s nuceným oběhem je na obr. (Někdy se pro tyto kotle používá i název La Mont). Jak je vidět z uvedeného schématu, kotel s nucenou cirkulací ve výparníku se až tak výrazně neodlišuje od zapojení kotle s přirozenou cirkulací, ohřívač napájecí vody je rovněž připojen k bubnu kotle a do varnic vstupuje voda z bubnu o stavu sytosti $x = 0$. Rozdíl je především v tom, že v zavodňovacím potrubí výparníku je zařízení oběhové čerpadlo (dopravní přetlak kolem 0,3 až 0,6 MPa v případě svislých varnic), které zajišťuje dostatečný průtok pro spolehlivý provoz výparníku. Napájecí voda se přivádí do ohřívače vody a z něj se vede do bubnu. Cirkulaci ve výparníku zajišťuje oběhové čerpadlo. Sytá pára z bubnu se přehřívá v přehříváku. Další rozdíl je i v tom, že výparník kotle s nuceným oběhem nemusí být nutně proveden ze svislých trubek, ale může být zhotoven z vodorovných trubkových hadů (typické pro kotle využívající teplo odpadních spalin).

Kotle průtočné

Především problémy s cirkulací ve výparníku u kotlů s přirozeným oběhem očekávané při zvyšování tlaku páry, dále i poměrně složitý systém výparníku s bubnem a zavodňovacími trubkami, ale zejména nemožnost využít kotlů s cirkulací ve výparníku (at' již s přirozenou nebo nucenou) pro velmi vysoké tlaky a nadkritické parametry (kritické parametry 225,6 bar;



374° C), to byly hlavní podněty k vývoji kotle průtočného. Základní myšlenka průtočného kotle je jednoduchá a spočívá v tom, že ohřev vody na bod varu, odpaření vody a přehřátí vyrobené páry je soustředěno do „jedné“ trubky, do které se na vstupu přivádí napájecí voda a z výstupu se odvádí přehřátá pára, tak jak je naznačeno na obr.

Základní odlišnost průtočného systému od systému s oběhem vody je především v tom, že průtočný systém nemá buben a jednotlivé části tlakového systému navzájem na sebe navazují, nemají žádný společný prvek. U oběhového systému jsou ohřívák vody, výparník i přehřívák napojeny na buben.

Obecně u průtočného systému není pevný začátek a konec odpařování a poloha výparníku v kotli se mění v závislosti na výkonu kotle, změně teploty napájecí vody, struskování stěn ohniště apod.

Další rozdíl je i ve stavu páry vstupující do přehříváku. Zatímco u kotlů s oběhem vody buben kotle jasně odděluje sytou páru a vodu a do přehříváku vstupuje sytá pára zbavená vlhkosti (až na nepatrné stopy), u průtočného kotle toto jasné oddělení chybí. Do přehříváku se vzhledem k vyšší rychlosti proudění ve varnici strhuje spolu s párou i vodní mlha.

Rozdíl je i ve způsobu regulace kotle. U průtočného kotle odpadá regulace hladiny v bubnu a kotel se reguluje tak, že se trvale udržuje stálý poměr mezi průtokem vody napájené do kotle a tepelným výkonem ohniště. Uvedené hlavní důvody, které byly podnětem k nástupu průtočných kotlů, byly vlastně reakcí až na problémy, se kterými se konstruktéři té doby potýkali, nebo které pro další vývoj kotlů předvídali. Samotná idea průtočného kotle, která ale vznikla již dříve, byla jednotlivými vynálezci realizována pod jiným zorným úhlem. První patenty na řešení průtočného kotle byly uděleny Bensonovi, pak přišli se svojí koncepcí Sulzer a Ramzin.