

PROBLEMATIKA VÍŘIVÝCH KÁDÍ

Ing. LADISLAV CHLÁDEK, CSc., Henkel-Ecolab, s. r. o., Brno

Klíčová slova: vířivá kád', mladina, hrubé kaly

1. LITERÁRNÍ PŘEHLED

Hrubé kaly, které se nejdříve usazují při chlazení horké mladiny, jsou v podstatě lom, vzniklý při chmelovaru. Jeho množství závisí na jakosti svařovaného sladu, kvantitativní i kvalitativní stránce chmelení, způsobu rmutování, průběhu scezování, době a intenzitě chmelovaru. Značný význam má rovněž obsah polyfenolových látek a varem koagulovatelného dusíku v mladině [1, 2, 3]. Tato literatura udává, že 1 hl 12% mladiny obsahuje 20 až 70 g hrubých kalů, přičemž tato hodnota se zvyšuje při zpracování špatně rozluštěných sladů, při kalném stékání mladiny, špatném provaření rmutů, infuzním a krátkém rmutování, dávkování chmele s vysokým obsahem polyfenolů, vy-

Diskutabilní zůstává nadále otázka vlivu hrubých kalů na průběh kvašení mladiny. Většina prací udává, že hrubý kal musí být před kvašením dobře odstraněn, jinak by mohly vzniknout problémy s vyšší barvou, drsnější hořkostí, zhoršenou pěnivostí. Někteří sládkové však tuto zkušenost nepotvrzují.

Velikost částecek hrubého kalu bývá 30 až 80 μm , jeho hustota je však velmi blízká horké mladině. Sedimentační pokusy prokázaly rychlost usazování částice hrubého kalu pouze asi $4,1 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, tj. asi $1,5 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Z tohoto důvodu se v předchozím období pro sedimentaci hrubých kalů nejvíce rozšířily chladicí stoky, kde dráha pohybu částice hrubého kalu je velmi krátká. Vedle chladicích stoků se pro separaci hrubých kalů dále používají chladicí usazovací kádě, odstředivky, dekantéry, hydrocyklóny a lamelové usazovky. Rozšíření těchto zařízení v našich pivovarech je však v současné době zanedbatelné, neboť pro tento účel jsou téměř výlučně používány vířivé kádě.

První vířivé kádě byly zkonstruovány na základě teorie A. Einsteina z roku 1925, který si všiml shromáždění listků čaje ve středu šálku po předchozím zamíchání lžičkou [4]. Tento jev si vysvětlil vlivem působení mezní vrstvy, vznikající při pohybu tekutiny na dně a stěně šálku. Obvodová rychlost rotující kapaliny se zvětšuje úměrně se zvyšující se hodnotou poloměru, v oblasti mezní vrstvy se však snižuje na nulu. V dů-

sledku obvodové rychlosti však vzniká i odstředivá síla, jejíž hodnota je maximální poblíž mezní vrstvy. Superpozicí sil – Coriolisův zákon – vzniká sekundární proudění, které má za následek vytvoření kužele čajových listků ve středu dna nádoby.

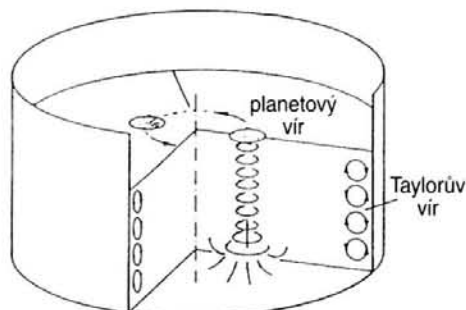
Studiem hydrodynamických poměrů, vznikajících během čerpání mladiny do vířivé kádě a její následné rotace, se zabývala řada autorů. V roce 1940 začal studovat hydrodynamiku vířivé kádě Bödewadt [5]. Za velmi zjednodušených podmínek sestavil Navier-Stokesovy rovnice, popisující proudění částic. Uvažoval například stacionární proudění a laminární režim; ve skutečnosti je proudění turbulentní a nestacionární.

V průběhu dalšího řešení se prokázala nestabilita proudění při vyšších nátokových rychlostech ($c = 10$ až $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), která má za následek vznik dvou typů vírů (obr. 1).

- Taylorův vír, který se vytváří ve větším množství v blízkosti mezní vrstvy u stěny nádoby, jeho osa je horizontální,
- planetový vír s vertikální osou vzniká především ve středu nádoby a jeho působením se může narušit tvorba kalového koláče.

V současné době se hydrodynamikou vířivé kádě zabývá řada autorů, např. Dürholt, Denk, Michel a další [6, 7, 8, 9]. Dürholt a Denk si ve svých pracích vytyčili dvě oblasti výzkumu:

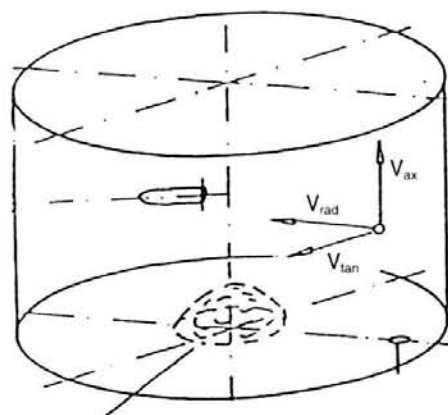
- a) chování částic pevné fáze (sedimentace a kohezí síly),
- b) hydrodynamický režim rotující horké



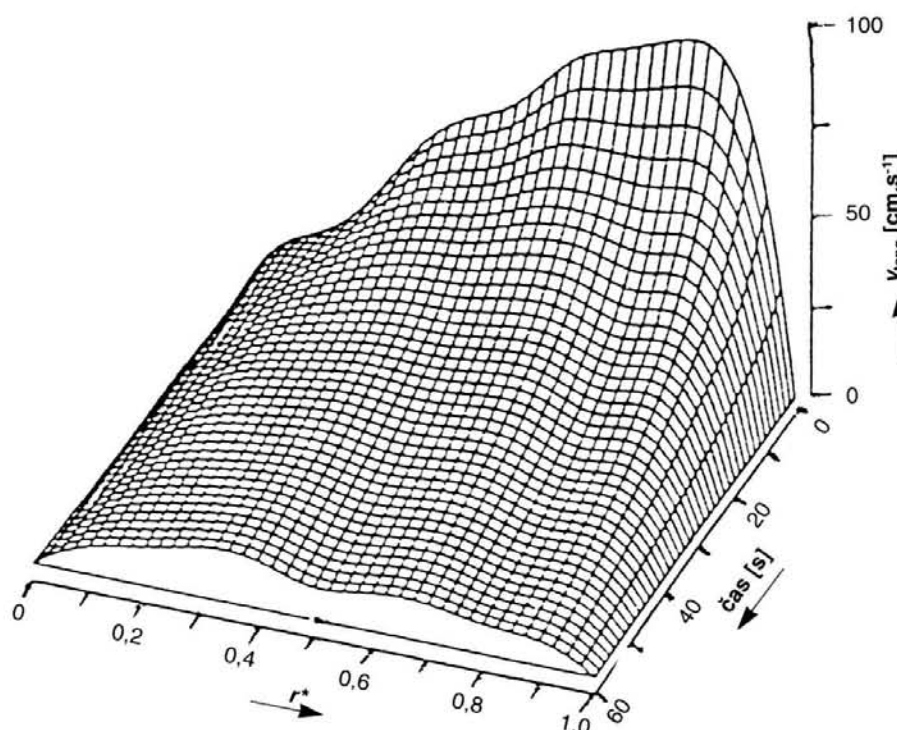
Obr. 1 Rozdělení typů vírů ve vířivé kádě [5]

sokém obsahu kovových iontů a nízkém pH mladiny.

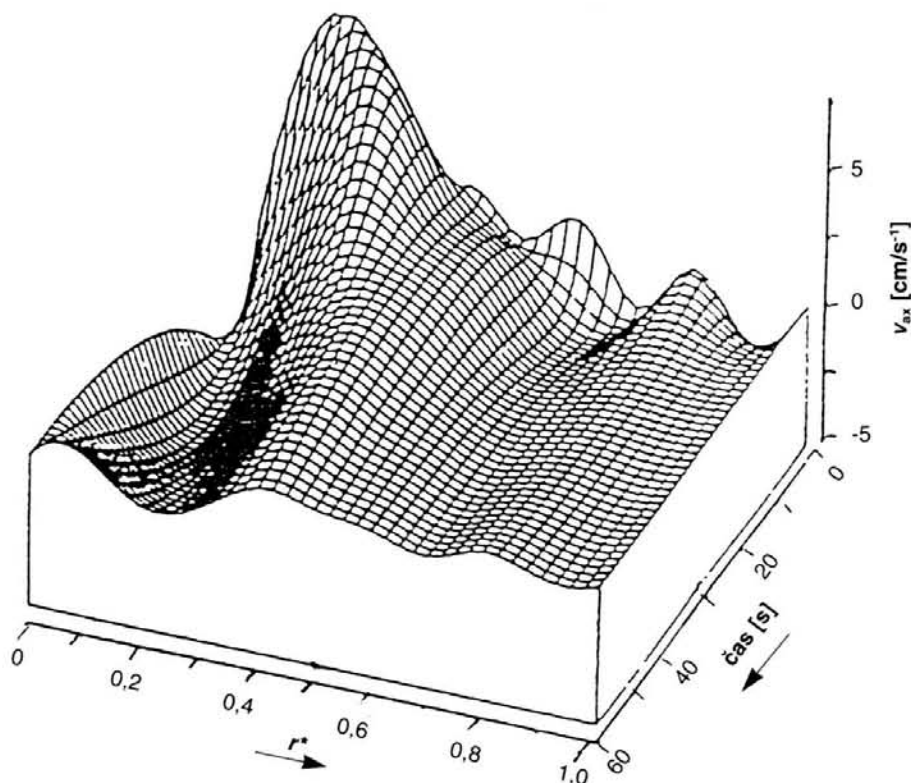
Hrubé kaly obsahují průměrně asi 50 až 60 % dusíkatých látek, 20 až 30 % tříslovin, 15 až 20 % hořkých chmelových látek a 2–3 % popela. V popelu bylo nalezeno 24–36 % hliníku a železa, dále 0,9 až 27 % mědi [3]. Z technologického hlediska je zadržování kovů v hrubých kálech příznivé, neboť tím se zamezuje jejich hromadění v pivu, kde mají nepříznivý vliv na koloidní stabilitu.



Obr. 2 Rozdělení složek rychlosti proudění ve vířivé kádě



Obr. 3 Rozložení tangenciální rychlosti v_{tan} ve vířivé kádě v závislosti na bezrozměrném poloměru r^* [6, 7, 8]



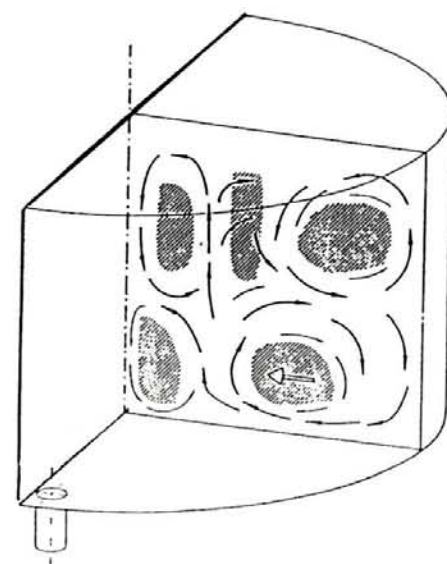
Obr. 4 Rozložení axiální rychlosti v_{ax} ve vířivé kádě v závislosti na bezrozměrném poloměru r^* [6, 7, 8]

svého maxima přibližně ve třech čtvrtinách poloměru vířivé kádě, a to na začátku rotace. S narůstajícím časem však dochází k rychlému poklesu této složky, a poté k její téměř konstantní hodnotě v rozsahu celého poloměru.

Složka radiální rychlosti v_{rad} nabývá na začátku měření dvou extrémů, které však opět s narůstajícím časem mizí a dochází k praktickému vyrovnání pouze s jedním minimem poblíž středu vířivé kádě.

Složka axiální rychlosti v_{ax} má extrémní hodnotu v bezprostřední blízkosti osy vířivé kádě s dalšími lokálními maximy, které však v průběhu času mizí. Nejvyšší vrchol postupem času rovněž mizí a přechází překvapivě v minimum.

Vedle sledování průběhu hodnot jednotlivých složek rychlosti proudění v závislosti na čase se zjišťoval i celkový obraz proudění (obr. 6). Oproti předpokladu, založenému na původní Einsteinově teorii, která předpokládá



Obr. 6 Rozložení proudění ve vířivé kádě, šrafovaná oblast je zóna klidu [4, 5, 6]

mladiny (stanovení proudnic, tvorba vírů, turbulence).

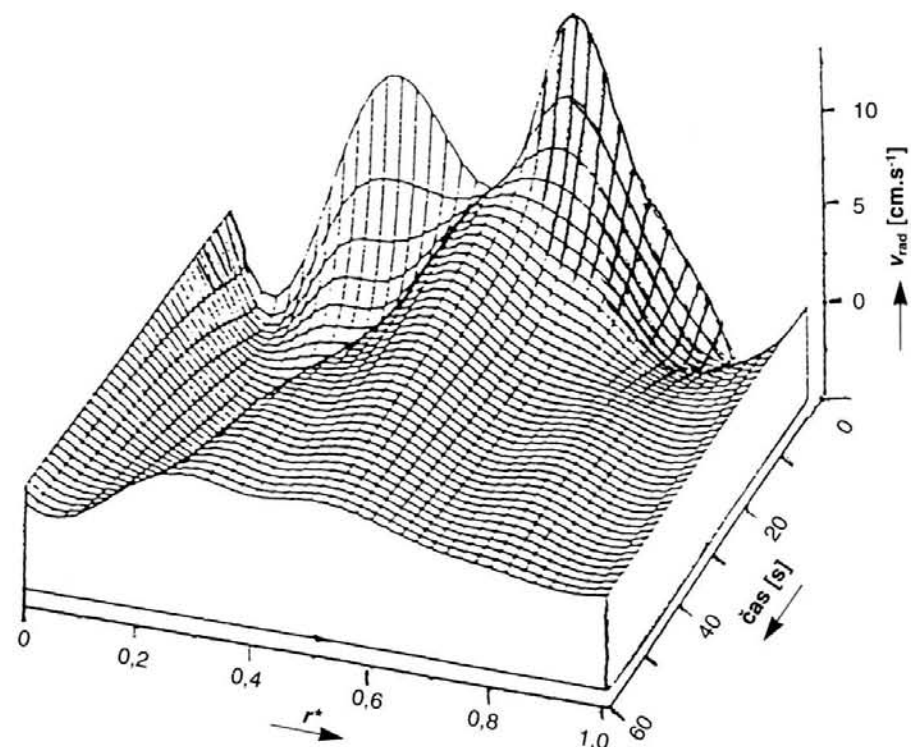
Autoři pro tyto práce použili laserovou anemometrii (bezdotykovou měřicí optickou metodu s elektronickým vyhodnocováním s následnou vizualizací proudnic), měřená vířivá kádě měla rovné dno.

Pro vyhodnocování měření zavedli tři složky rychlostí (obr. 2)

- tangenciální rychlost v_{tang}
- axiální rychlost v_{ax} ,
- radiální rychlost v_{rad} .

Časový průběh počítačem zpracovaných jednotlivých složek rychlostí snímaných ze stejného místa je patrný z obrázků 3, 4 a 5.

Z uvedených výsledků měření má zajímavý průběh složka tangenciální rychlosti v_{tang} , která na počátku měření dosahuje

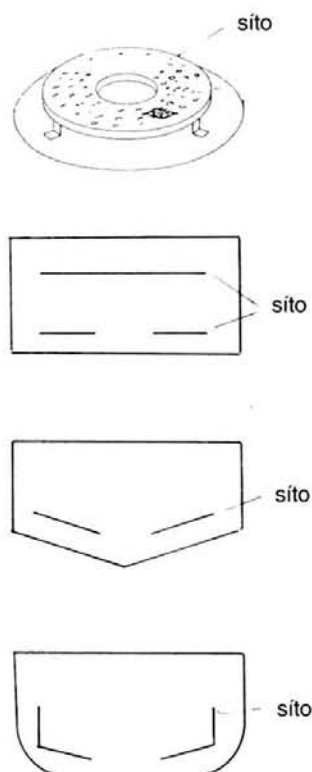


Obr. 5 Rozložení radiální rychlosti v_{rad} ve vířivé kádě v závislosti na bezrozměrném poloměru r^* [6, 7, 8]

dala pouze jedno sekundární proudění, potvrdily výsledky měření přítomnost minimálně dvou sekundárních proudění, z nichž jedno má pravděpodobně za následek možné rozrušení již vytvořeného kalového koláče při nevhodné geometrii vířivé kádě (stíhlé kádě s poměrem výšky vůči průměru jedna a více). Tento problém navrhli Dürholt a Denk řešit instalací koaxiálního síta, jehož tvar i výška umístění jsou řešeny tak, že eliminuje rušivý vliv vnitřního sekundárního proudění. Některé typy vestaveb jsou patrné z obr. 7.

Další výzkumné práce byly zaměřeny na vliv geometrie dna vířivé kádě na účinnost separace hrubých kalů. Přehled nejčastěji používaných tvarů dn vířivých kádí je patrný na obr. 8. Nejlepší výsledky prokázaly vířivé kádě se středovou kalovou jámkou.

Jako novinka v oblasti vývoje vířivých kádí se uvádí kombinace vířivé kádě s interním vařákem. Tato konstrukce má uspořít jednu nadstavbu varní garnitury. Lze ji použít i pro systém vaření mladiny s chmelem



Obr. 7 Různé typy vestavěb do vířivé kádě

za nízkého tlaku, tzv. NDK systém (Niederdrucksystem). Rotace mladiny se dosahuje u tohoto zařízení oběžným čerpadlem.

2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST A METODIKA PRACOVNÍHO POSTUPU

Pro posouzení vhodnosti jednotlivých typů vířivých kádí, používaných v našich pivovarech, byla provedena experimentální práce, při které byla věnována pozornost zejména následujícím parametrům:

- obsahu kalů v mladinové pánvi,
- geometrii vířivé kádě,
- nátokové rychlosti mladiny do vířivé kádě,
- hydraulickým ztrátám v potrubí mezi mladinovou pánví a vířivou kádí,
- množstvím kalů ve spílané mladině.

Pro stanovení obsahu kalů v čerpané i spílané mladině byla použita následující metodika: připravily se odběrové kohouty na přívodu horké mladiny a na odvodním potrubí, vzorky se odebíraly rovněž dvířky ve víku kádě. Horká mladina z várky, chmelené pouze extraktem a chmelovými granulami, byla v termostatu dopravena do laboratoře, kde do frity S4 bylo naváženo 2,5 g křemelinu HSC, upravené promytím kyselinou chlorovodíkovou (vyplavení iontů železa). Frita s křemelinou byla následně vysušena při teplotě 105 °C po dobu tří hodin. Poté bylo filtrováno na fritě 100 ml horké mladiny, frita byla propláchnuta 100 ml horké destilované vody a následně sušena při 105 °C po dobu tří hodin. Pro každý vzorek byla provedena tři stanovení. Vzorky horké mladiny byly odebírány po předchozím řádném promíchání v mladinové pánvi v časových intervalech, závislých na době spílení. Časový interval byl volen z hlediska opti-

málního zachycení průběhu kolísání kalů v mladině a zpravidla se pohyboval v rozsahu 5–10 minut.

Pro objektivní vyhodnocení naměřených výsledků byla použita metoda bezrozměrné analýzy. Jako sledované hodnoty byly uvažovány následující parametry:

- rychlost nátoku,
- průměr kádě,
- výška hladiny mladiny ve vířivé kádí,
- hustota mladiny,
- dynamická viskozita mladiny,
- obsah hrubých kalů v mladinové pánvi,
- střední obsah kalů ve spílané mladině,
- délka potrubí od mladinové pánve k vířivé kádí,
- rozdíl výšky mezi mladinovou pánví a vířivou kádí,
- průměr potrubí mezi mladinovou pánví a vířivou kádí,
- tlaková ztráta v důsledku vestavěných ohybů, armatur, kontrakce na vstupu do trysky.

Pro zjednodušení následujícího matematického vyhodnocení se tlaková ztráta Δp nahradila ekvivalentní délkou potrubí podle následujících empirických vztahů, převzatých z literatury [10]:

- ohyb 45° 20 d
- ohyb 90° 40 d
- uzavírací ventil 300 d
- průchozí klapka 100 d
- zpětná klapka 300 d

Potom tlaková ztráta, způsobená ohyby a armaturami je úměrná ekvivalentní délce potrubí:

$$L_{\text{ekv}} = \sum_{i=1}^n n \cdot d \quad (1)$$

Další ztrátu tlaku proudící mladiny způsobuje tření v trubce, které je závislé na hydrodynamickém režimu, které se stanovuje vyhodnocením Reynoldsova kritéria:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

Ve všech případech hodnocení vířivých kádí přesahuje hodnota Reynoldsova kritéria spodní mez, stanovenou pro turbulentní proudění.

Výpočet hydrodynamické ztráty při turbulentním režimu proudění je dán vztahem [11]:

$$h_f = \lambda \left[\frac{L_{\text{ekv}} + L}{d} \right] \frac{v^2}{2g} + \xi \frac{v^2}{2g} + h \quad (3)$$

Hodnota součinitele tření λ při turbulentním proudění je dána vztahem

$$\lambda = 0,1 \cdot (2 \cdot \varepsilon)^{0,25} \quad (4)$$

kde ε součinitel drsnosti, v trubkách pro měřené případy nabývá hodnot [12]:

pro trubky z oceli třídy 11 (černé trubky) $\varepsilon = 0,15$

pro trubky z oceli třídy 17 (nerezavějící ocel) $\varepsilon = 0,05$

Výpočet koeficientu odporu ξ pro vtokovou trysku na vstupu do vířivé kádě se provádí dosazením do následujícího vztahu:

$$\xi = \left[\frac{F_2}{\eta \cdot F_1} - 1 \right]^2 \quad (5)$$

Hodnoty součinitele η udává např. práce [12]. Tímto postupem se podstatně sníží počet

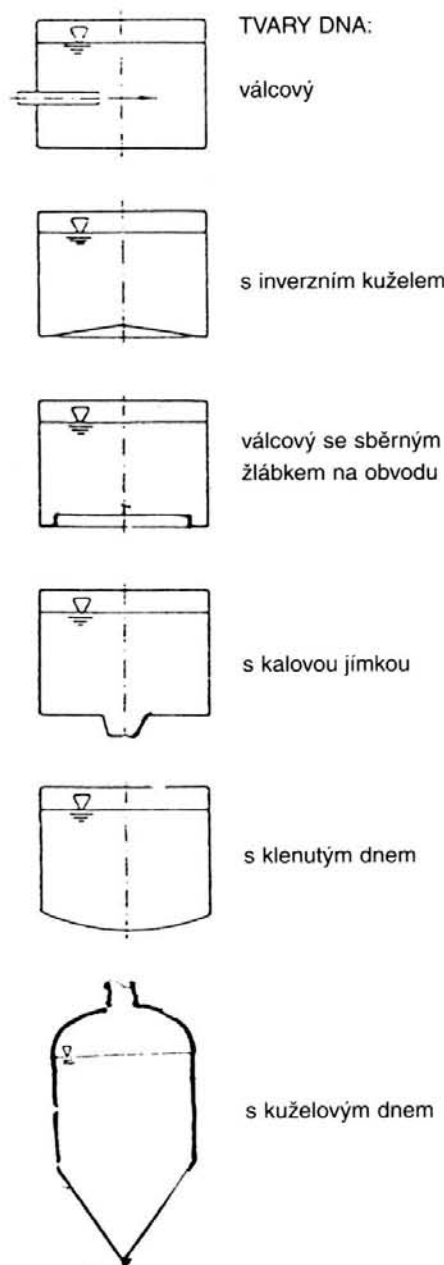
parametrů pro zadání bezrozměrové analýzy, neboť místo původně uvažovaných parametrů L , h a Δp nadále pracujeme pouze s jedním parametrem h_f .

Bezrozměrová analýza je založena na předpokladech:

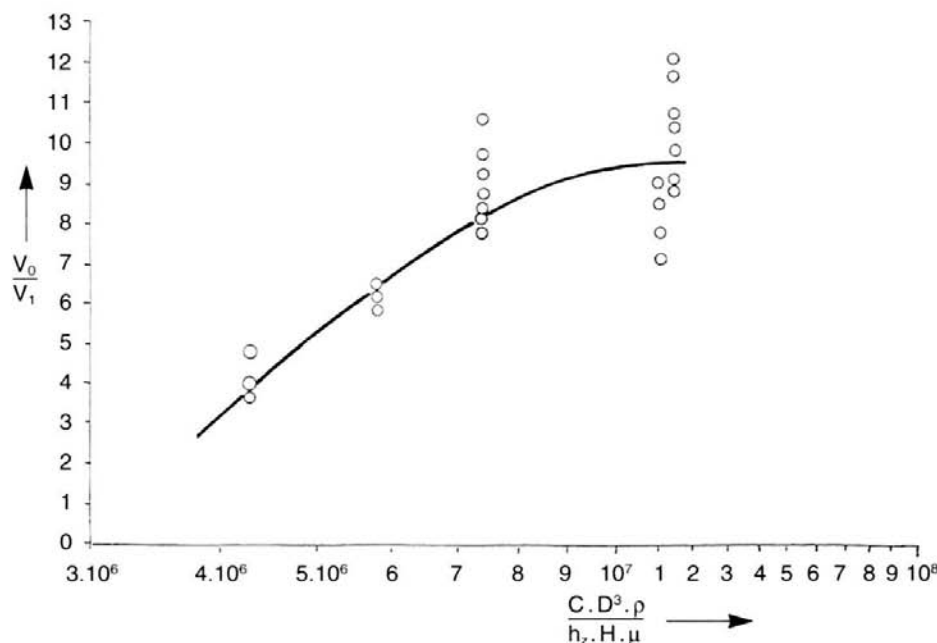
- rozměr každé fyzikální veličiny lze vyjádřit jako součin mocnin základních rozměrů,
- každou zvolenou funkci lze transformovat do kritériálního vztahu. Za těchto předpokladů zpracováním zadaných parametrů obdržíme dvě kritéria:

$$\frac{V_0}{V_1} \quad \dots \text{určující poměr účinnosti separace horkých kalů} \quad (6)$$

$$\frac{c \cdot D^3 \cdot \rho}{H \cdot h_f \cdot \mu} \quad \dots \text{určující podobnost jevů ve vířivé kádí, ke kterým dochází vlivem setrvačných sil a sil vnitřního tření.} \quad (7)$$



Obr. 8 Nejpoužívanější geometrie pro vířivé kádě



Obr. 9 Vliv hydrodynamického režimu vířivé kádě na separaci hrubých kalů

Všechny experimentálně získané hodnoty byly podle uvedeného postupu zpracovány a ve formě dvou kritérií vyneseny do obr. 9. Hodnoty dynamické viskozity μ a hustoty ρ byly pro horkou mladinu odečteny z literatury [13].

3. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Z analýzy průběhu grafu na obr. 9 je patrné, že se separační efekt úměrně zvyšuje se stoupající hodnotou kritéria

$$\frac{c \cdot D^3 \cdot \rho}{H \cdot h_z \cdot \mu}$$

Z jeho tvaru je zřejmé, že jeho hodnota stoupá s rostoucím poměrem D/H (nevýhoda konstrukce tzv. štíhlých kádí), dále s rostoucí nátokovou rychlostí (tato je však omezena hodnotou 9–10 m.s⁻¹, neboť při vyšších rychlostech může docházet k dezintegraci mladinového lovu a zvyšování energetické náročnosti operace). Rovněž je patrný negativní vliv ztrátové výšky h_z . Uvedený průběh kritériálního vztahu lze s výhodou využít jak pro navrhování nových vířivých kádí, tak při rekonstrukci starých nebo s nevyhovujícím provozem.

SEZNAM SYMBOLŮ

| | | |
|----------------|--|----------------------|
| c ... | nátoková rychlost mladiny do vířivé kádě | (m.s ⁻¹) |
| d ... | průměr přírodního potrubí mladiny | (m) |
| D ... | průměr vířivé kádě | (m) |
| F_1 ... | průřez nezmenšeného potrubí | (m ²) |
| F_2 ... | průřez zmenšeného potrubí | (m ²) |
| g ... | gravitační konstanta | (m.s ⁻²) |
| h ... | výškový rozdíl mezi vířivou kádí a mladinovou pánví | (m) |
| h_z ... | hydrodynamická ztráta | (m) |
| H ... | výška mladiny ve vířivé kádě | (m) |
| i ... | okamžité měření | (1) |
| L ... | délka potrubí mezi vířivou kádí a mladinovou pánví | (m) |
| L_{ekv} ... | ekvivalentní délka potrubí zohledňující hydraulické ztráty | (m) |
| n ... | počet ohybů a armatur | (1) |
| Δp ... | tlaková ztráta | (Pa) |
| Re ... | Reynoldsovo kritérium | (1) |
| v ... | rychlost proudění mladiny | (m.s ⁻¹) |
| v_{ax} ... | axiální složka proudění mladiny ve vířivé kádě | (m.s ⁻¹) |
| v_{rad} ... | radiální složka proudění mladiny ve vířivé kádě | (m.s ⁻¹) |

| | | |
|-------------------|---|----------------------------|
| v_{tang} ... | tangenciální složka proudění mladiny ve vířivé kádě | (m.s ⁻¹) |
| V_0 ... | obsah hrubých kalů v mladině v mladinové pánvi | (mg.100 ml ⁻¹) |
| V_1 ... | obsah hrubých kalů ve spílané mladině | (mg.100 ml ⁻¹) |
| λ ... | součinitel tření při proudění | (1) |
| μ ... | dynamická viskozita | (Pa.s) |
| η ... | součinitel kontrakce | (1) |
| ρ ... | hustota horké mladiny | (kg.m ⁻³) |
| ξ ... | součinitel odporu | (1) |
| ε ... | součinitel drsnosti | (1) |
| r^* ... | bezrozměrný poloměr $r^* = \frac{r}{R}$ | (1) |
| r ... | okamžitá hodnota poloměru, kde probíhá měření | (m) |
| R ... | skutečný poloměr vířivé kádě | (m) |

LITERATURA

- [1] CHLÁDEK, L., ČUŘÍN, J., ŠVECŮV, A.: Optimalizace funkce vířivé kádě. Závěrečná zpráva VÚPS Praha 1992
- [2] BASAŘOVÁ, G., ČEPIČKA, J.: Sladařství a pivovarství, skripta VŠCHT, Praha, SNTL, 1985
- [3] HLAVÁČEK, F., LHOTSKÝ, A.: Pivovarství, SNTL, 1972
- [4] EINSTEIN, A.: Naturwissenschaften, **11**, 1926, s. 223
- [5] BOEDEWADT, U. T.: Zamm Zeitschrift, **20**, 1940, s. 241
- [6] DUEHOLT, A., DENK, V.: Brauwelt, **126**, 1986, s. 1960
- [7] DENK, V., MUELLER, H.: Brauwelt Int. II/1991, s. 126
- [8] DENK, V.: Brauwelt Int. II/1990, s. 114
- [9] MICHEL, R., SOMMER, K.: Mschr. Brauwis., **37**, 1984, s. 25
- [10] MAŠTOVSKÝ, O.: Hydromechanika, Praha SNTL, 1964
- [11] DOHNAL, J.: Základní vztahy chemické a potravinářské výroby, skripta ČVUT, Praha, 1977
- [12] KOLÁŘ, V. a kol.: Hydraulika průmyslových armatur, Praha SNTL, 1963
- [13] ŠESTÁK, J.: Tepelné pochody, skripta ČVUT, Praha, 1986