

Laboratorní výzkum rmutovacího procesu

Dr. Ing. GÜNTER ARNDT, Doc. Dr. Ing. LOTHAR LINKE, Technická universita Drážďany
katedra potravinářského a chemického inženýrství

Účelem rmutovacího procesu, jedné z nejdůležitějších operací při výrobě piva, je převedení škrobu a části bílkovin do vodného roztoku. K rozštěpení těchto vysokomolekulárních látek a k převedení na rozpustný extrakt se využívá reakcí katalyzovaných enzymy. Ty jsou obsaženy již ve sladu, v případě surogace je nutno je zvlášť do vystírky aplikovat. Enzymové pochody jsou kromě doby a teploty reakce podmíněny též intenzitou přenosu hmoty. Jedním z faktorů, který má hlavní vliv na rychlost přenosu hmoty, je hodnota frekvence otáčení míchadla. Touto problematikou se zabývali pracovníci Technické univerzity v Drážďanech a získané výsledky jsou obsahem tohoto článku.

Míchadlo a jeho úloha při rmutování

Mícháním se zajišťuje rovnoměrné rozdělení pevné fáze v kapalině. Během rmutování pevná fáze probíhajícími extrakčními a biochemickými pochody svoje složení neustále mění. Optimální podmínky jsou dosaženy, je-li celá plocha pevné fáze přístupná kapalině [1].

Další úlohou míchání je zabezpečit relativní pohyb mezi pevnou a kapalnou fází, tím je umožněn intenzivní přenos hmoty, tj. rychlý transport extraktu z mezní vrstvy, vytvořené kolem pevné fáze. Proto je nutné zajistit maximální koncentrační spád jako hnací sílu extrakčního pochodu. Intenzivní míchání je též nutné

pro přenos tepla z teplosměnné plochy do kapalně fáze a následnou konvekci do pevné fáze.

Rychlost proudění a velikost turbulence ve rmutovací pánvi jsou závislé na tvaru míchadla, frekvenci otáčení, konstrukčním provedení a celkové geometrii míchaného systému. Podstatný vliv má též umístění míchadla v nádobě. Z konstrukčních důvodů je rozsah frekvence otáčení míchadla omezen v určitém rozsahu. Jeho spodní hranice je určena podmínkou, aby všechny částice pevné fáze byly průběžně ve vznosu. Maximální hodnota frekvence otáčení míchadla není jednoznačně stanovena, avšak vedle energetických požadavků je nutno uvážit i velikost odstředivé síly. Též je nutno uvážit okolnost, že při intenzivním míchání se mohou poškozovat pluchy, což nepříznivě ovlivňuje vedle ztíženého scezování i kvalitu hotového produktu. Z tohoto důvodu byly experimentální práce omezeny pouze na stanovení spodní hranice frekvence otáčení míchadla.

Stanovení minimální frekvence otáčení míchadla

K zamezení sedimentace částic pevné fáze během rmutování je nutno dodržet podmínku, aby vertikální komponent míchání byl větší než sedimentační rychlost pevné fáze [2]. Tato minimální (kritická) frekvence otáčení závisí na těchto parametrech:

— průměr a hustota částic pevné fáze, hustota kapal-

né fáze, viskozita, povrchové napětí, koncentrace pevné fáze v kapalně,

- geometrie rmutovací pánve,
- tvar míchadla,
- poloha míchadla.

Protože se během rmutování fyzikální parametry suspenze mění, byl uvažován nejnepříznivější případ. Ten nastává bezprostředně po zahájení procesu. Sedimentační rychlost částic pevné fáze je v tomto úseku rmutovacího pochodu maximální (maximální velikost pevné fáze a minimální hustota kapalně fáze).

K určení minimální hodnoty frekvence otáčení byly použity dvě metody:

- kritérium jedné sekundy,
- kritérium výšky vrstvy.

Při použití kritéria jedné sekundy se určí minimální frekvence otáčení míchadla z podmínky, aby žádná částice pevné fáze nezůstávala na dně míchaného systému po dobu delší jedné sekundy.

Při aplikaci kritéria výšky vrstvy se během procesu sleduje výška doletu pevných částic.

Kritérium jedné sekundy

Tato metoda, používaná pro stanovení minimální frekvence otáčení turbinových, lopatkových nebo šroubových míchadel, byla popsána *Hoblerem a Zablockim* [3]. Autoři odvodili vztah pro výpočet hodnoty frekvence míchadla, při níž se suspenze úplně rozmíchává:

$$\frac{n \cdot \rho_0 \cdot d_R^2}{\eta} = C \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{0,6} \cdot \left(\frac{\rho_c \cdot g \cdot d_R^2}{\eta_2} \right)^{0,45} \cdot \left(\frac{m_c}{m_s} \right)^{0,17} \cdot \left(\frac{d_T}{d_R} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{K}{d_R} \right)^{0,19} \cdot \frac{D}{d_R} \quad (1)$$

kde:

n	je minimální frekvence otáčení míchadla	$\{s^{-1}\}$
ρ_c	— hustota kapalně fáze	$\{kg \cdot m^{-3}\}$
d_R	— průměr míchadla	$\{m\}$
η	— viskozita kapalně fáze	$\{Pa \cdot s\}$
C	— konstanta (autoři uvádějí $C=4,629$)	$\{1\}$
$\Delta \rho$	— rozdíl hustot kapalně a pevné fáze	$\{kg \cdot m^{-3}\}$
m_s	— hmotnost pevné fáze	$\{kg\}$
m_c	— hmotnost kapalně fáze	$\{kg\}$
K	— vzdálenost míchadla ode dna míchaného systému	$\{m\}$
D	— průměr nádoby	$\{m\}$
g	— gravitační zrychlení	$\{9,81 m \cdot s^{-2}\}$
d_T	— střední velikost částic	$\{m\}$
	$n \cdot d_R^2 \cdot \rho_c$	$\{m\}$

Laboratorně byly stanoveny hodnoty: $\rho_c = 990,21 kg \cdot m^{-3}$

$\eta_c = 0,5958 mPa \cdot s$	$m_s = 1,82 kg$	$K = 0,018 m$
$\Delta \rho = 65 kg \cdot m^{-3}$	$m_c = 6 kg$	$D = 0,018 m$
		$d_T = 0,002 m$

Při použití rovnice (1) vychází pro míchadlo o průměru 0,076 m minimální frekvence otáčení 119,2 min⁻¹.

Kritérium výšky vrstvy

Na základě rozsáhlé experimentální práce *Einenkel a Mersmann* [2] navrhli následující algoritmus pro výpočet minimální frekvence otáčení míchadla, při níž tuhá fáze je ještě úplně suspendována. Ten se skládá ze stanovení sedimentační rychlosti částic pevné fáze a z výpočtu požadované frekvence podle empirického vzorce:

$$13 = \sqrt[3]{Fr^* \cdot \frac{v_s}{v_u \varphi_u}} \quad (2)$$

kde Freudeho kritérium Fr^* má tvar:

$$Fr^* = \frac{n^2 d_R \rho_c}{g \cdot \Delta \rho}$$

sedimentační rychlost částic pevné fáze v_s se stanoví z těchto rovnic [2]:

$$d_T = c_w^{0,75} \cdot \frac{\rho_c \cdot v_s^2}{g \cdot \Delta \rho} \quad (3)$$

Koeficient odporu c_w závisí na hodnotě Reynoldsova kritéria. Obecný tvar Reynoldsova kritéria je udáván ve formě:

$$Re = \frac{d_T \cdot v_s \cdot \rho_c}{\eta_c} \quad (4)$$

V našem případě se hodnota Reynoldsova kritéria pohybuje v rozsahu $122 < Re < 10^3$. Pro tuto oblast platí pro výpočet koeficientu odporu c_w tento vztah:

$$c_w = \frac{6,5}{Re^{0,4}}$$

Rovnice (3) platí pro osamocenou částici. Pro shluk částic je nutno získanou hodnotu korigovat podle empirického vztahu:

$$v_{ss} = v_s (1 - \varphi_v)^{4,65} \quad (5)$$

kde:

v_{ss} je korigovaná sedimentační rychlost $\{m \cdot s^{-1}\}$

$$S_u = \frac{V_s}{V_c} \text{ — poměr objemů} \quad (1)$$

V_s — objem tuhé fáze $\{m^3\}$

V_c — objem kapalně fáze $\{m^3\}$

Dosažením hodnot a vyčíslením vztahu (5) se získá hodnota

$$v_{ss} = 0,0089 m \cdot s^{-1}$$

Podle uvedeného algoritmu se určí frekvence otáčení [2]:

$$n = 5,86 s^{-1}$$

Reynoldsovo kritérium pro míchání Re_M má tvar:

$$Re_M = \frac{n \cdot d_R^2 \cdot \rho_c}{\eta_c} = 5,6 \cdot 10^4 \quad (6)$$

Získaná hodnota Reynoldsova kritéria je podstatně menší, než předepisuje algoritmus ($Re = 10^6$). Proto by bylo nutné výpočet opakovat s jinou konstantou v rovnici (2). Vzhledem k výsledku získaném kritériem jedné sekundy, je zřejmé, že tato hodnota nedává srovnatelné výsledky, a proto bude nutná její modifikace. Rovněž metoda jedné sekundy lze považovat pouze za aproximativní, neboť velikost částic kolísá v širokém rozmezí.

Laboratorní zařízení pro rmutování

Pro experimentální práce byl použit zmenšený model rmutovací pánve, standardního výrobku VEB Apparatenbau Nordhausen. Toto zařízení má obdélníkový průřez a je určeno pro sypání 5 000 kg. Modelováním bylo vyrobeno laboratorní zařízení (poměr zmenšení 1:17). Velikost frekvence otáčení míchadla ($d_R = 0,076 m$) laboratorního zařízení byl vypočten ze vztahu [4]:

$$\frac{n_H}{n_M} = \left(\frac{d_{RM}}{d_{RH}} \right)^y \quad (7)$$

kde:

n_H je frekvence otáčení míchadla provozního zařízení $\{s^{-1}\}$

n_M — frekvence otáčení míchadla modelu $\{s^{-1}\}$

d_{RH} — průměr míchadla provozního zařízení $\{m\}$

d_{RM} — průměr míchadla modelu $\{m\}$

y — exponent $\{1\}$

Frekvence otáčení laboratorního míchadla lze stanovit též tímto postupem:

Tabulka 1.

	Metoda/přístroj	Sledovaná hodnota
Rmut		
Doba zcukření	jódová zkouška	10 minut
pH hodnota	laboratorní pH-metr MV 84	5,2—5,6
Sladina		
Viskozita	Höpplerův viskozimetr	$\leq 1,7 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
pH	laboratorní pH-metr MV 84	5,2—5,6
Obsah extraktu	sacharometr	maximální hodnota
Celkový dusík	Kjeldahlova metoda	$\geq 70 \text{ mg/100 ml}$
Aminodusík	Spekol	$\geq 14 \text{ mg/100 ml}$
Barva	Spekol	13...14 EBC jednotek

Vyčísli se hodnota modifikovaného Reynoldsova kritéria pro míchání:

$$Re_M = \frac{n_M \cdot d_{RM}^2 \cdot \rho_c}{\eta_c}$$

Získaná hodnota se dosadí do vztahu:

$$c_{WM} = A \cdot Re_M^m \cdot Fr_M^p \quad (8)$$

kde: c_{WM} je hodnota Eulerova kritéria

$$\left(E_u = \frac{P_M}{\rho_c \cdot n_M^3 \cdot d_{RM}^5} \right) \quad (1)$$

A, m, p — konstanty (1)

P_M — příkon míchadla [W] (1)

Hodnoty konstant A, m, p jsou závislé na druhu míchadla. Pro třílopatkové vrtulové udává literatura [5] tyto hodnoty:

$$A = 1,19$$

$$m = -0,15$$

$$p = 0$$

Příkon míchadla se vypočte podle vztahu:

$$P_M = c_{WM} \cdot \rho_c \cdot n_M^3 \cdot d_{RM}^5 \quad (9)$$

Specifický objemový příkon míchadla P_{VM} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$]

$$P_{VM} = \frac{P_M}{V} \quad (10)$$

kde: V je objem zařízení [m^3].

Z podmínky shodných specifických objemových příkonů míchadla provozního i laboratorního zařízení byla vypočtena požadovaná frekvence otáčení míchadla experimentálního zařízení $n_M = 353 \text{ min}^{-1}$.

Rmutovací pánve byla temperována vodní lázní. Na tuto pánve navazovala scezovací kád obvyklé konstrukce. Tato kád byla rovněž temperována. Míchadla v obou nádobách byla poháněna stejným směrnými motorky s plynule regulovatelnou frekvencí otáčení.

Dvouhodinový chmelovar probíhá ve zvláštní nádobě, vyhříváné elektrickým vařičem. Sladina byla chmelena extraktem.

Popis experimentální práce

Slad z surogát byl mlet na laboratorním mlýnku (podíl pluch 21,1 %). Tato hrubost byla volena s ohledem na snadné stékání scezování. Při rmutování byl použit infúzní způsob:

40—45 °C vystírání, aplikace enzymů

50 °C peptonizační prodleva (60 min)

63 °C

cukrotvorná prodleva (40 min)

70—74 °C

pomalé zvýšení teploty (z 70 na 74 °C 20 min)

74 °C

do zcukření

78 °C

odrmutování

Vystírání bylo 1,2 kg sladu 0,62 kg surogátů do 6 litrů vody, při vystírce bylo aplikováno 0,42 g enzymu.

Scezování probíhalo při teplotě 78 °C. Sledované veličiny, metody a přístroje jsou uvedeny v tabulce 1.

Při experimentální práci byl sledován vliv frekvence otáčení míchadla na tyto veličiny, přičemž byla dodržena konstantní hodnota ostatních parametrů.

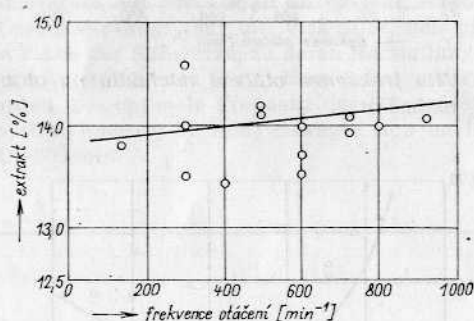
Vyhodnocení získaných poznatků

Výsledky byly získány ze dvou až tří pokusů, provedených vždy za dodržení konstantní hodnoty frekvence otáčení míchadla. Výsledky byly korelovány regresní analýzou.

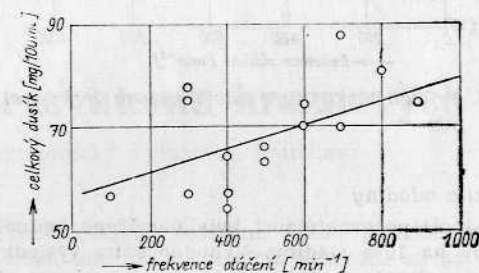
Obsah extraktu:

Z hodnot, naměřených sacharometrem, byla vypočtena regresní rovnice:

$$y = 13,85 + 0,0001635 x$$



Obr. 1. Vliv frekvence otáčení míchadla na obsah extraktu



Obr. 2. Vliv frekvence otáčení míchadla na obsah celkového dusíku

Směrnice přímky měla malou hodnotu (obr. 1), což znamená, že zvyšování hodnoty frekvence otáčení míchadla nemá podstatnější vliv na tvorbu extraktu během rmutování. Vyšší obsah extraktu lze získat jen značným zvýšením frekvence otáčení, což znamená zvýšení energetické náročnosti zařízení, ale zhoršení scezování (možnost poškození pluch).

Obsah celkového dusíku

Titrací bylo zjištěno potřebné množství 0,05 N kyseliny sírové (ml). Celkový obsah dusíku v mladině lze vypočítat touto rovnicí:

$$7 \text{ mg N} = 9,725 \text{ ml } 0,05 \text{ N H}_2\text{SO}_4$$

Lineární regresí se stanovila rovnice přímky

$$y = 56,86 + 0,025 x$$

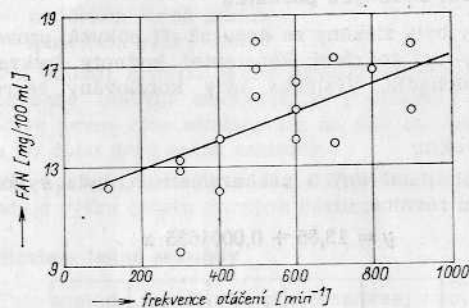
Se stoupající frekvencí otáčení přibývá množství celkového dusíku (obr. 2). Toto lze vysvětlit intenzivní

extrakcí tuhé fáze, podmíněné vysokým koncentračním gradientem.

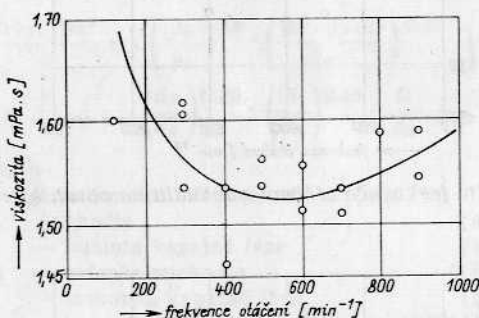
Obsah aminodusíku

Tento se stanovil přístrojem Spekol. Lineární regresí se opět získané výsledky vyhodnotily a získal výraz $y = 11,90 + 0,0052 x$

Obsah aminodusíku opět vzrůstá se stoupající frekvencí otáčení míchadla. Tento jev lze vysvětlit obdobně jako v předchozím případě. Je zajímavé, že požadovaná minimální hodnota 14 mg/100 ml byla dosažena až při frekvenci otáčení 400 min⁻¹.



Obr. 3. Vliv frekvence otáčení míchadla na obsah aminodusíku



Obr. 4. Průběh viskozity v závislosti na frekvenci otáčení

Viskozita mladiny

Pro lepší porovnatelnost byly naměřené hodnoty přepočteny na 10% sladinu. Vyhodnocením výsledků byla zjištěna nelineární závislost, kterou lze popsat obecnou rovnicí

$$x = a \cdot x^b \cdot e^{cx}$$

K prověření použitelnosti této metody byla aplikována porovnávací metoda [6]. Za předpokladu, že x a y jsou nezávisle proměnné, obdržíme nejdříve veličiny $x = x(x, y)$ a $y = y(x, y)$, které jsou lineárně závislé (aritmická řada s diferencí $h = 100$). Rovnice [15] potom přejde na tvar

$$Y = h \cdot c \cdot lge + b \cdot X$$

Dalším matematickým zpracováním byla odvozena rovnice

$$y = 3,24 \cdot x^{-0,1426} \cdot e^{0,00027x}$$

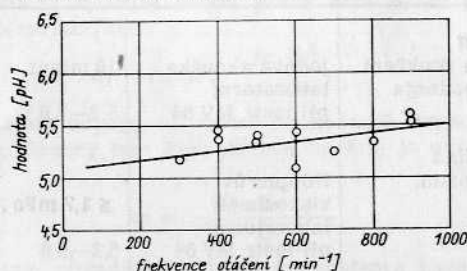
V rozsahu hodnot frekvence otáčení 500–600 min⁻¹ dosahuje křivka svého maxima. Tento poznatek má význam zejména pro operaci scezování a vyslazování.

Hodnota pH

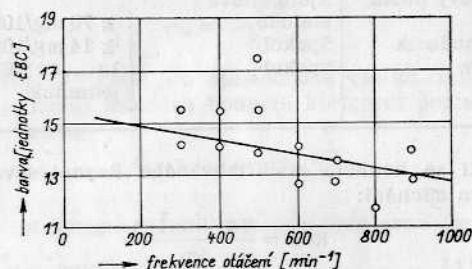
Vzorky byly měřeny pH-metrem při konstantní teplotě 20 °C. Lineární regresí byla z naměřených hodnot vy počtena závislost

$$y = 5,207 + 0,00026 \cdot x$$

Křivka má nepatrně stoupající tendenci. Při zvyšování frekvence otáčení se zvyšuje hodnota pH, což má nepříznivý vliv na činnost enzymů.



Obr. 5. Vliv frekvence otáčení na hodnotu pH



Obr. 6. Vliv frekvence otáčení míchadla na barvu mladiny

Barva mladiny

Z naměřených hodnot přístrojem Spekol byly přepočítány jednotky EBC. Ze získaných výsledků bylo opět lineární regresí získána závislost

$$x = 15,51 - 0,0029 \cdot x$$

Naměřené hodnoty (obr. 6) ukazují sestupnou tendenci při vzrůstající frekvenci otáčení.

Doba zcukření

Maximální doba zcukření při 74 °C byla 10 minut, změna frekvence otáčení neměla podstatnější vliv na délku procesu. Výsledky byly získány jedovou zkouškou; tato metoda je dosti nepřesná, neboť se nedá s dostatečnou přesností stanovit okamžik zcukření.

Závěr

Zvyšování frekvence otáčení míchadla ve rmutovací pánvi neprokázalo podstatnější vliv na tvorbu extraktu a dobu zcukření. Z velmi malé hodnoty tangenty regresní přímky lze odvodit, že teprve značné zvýšení frekvence otáčení míchadla má podstatnější vliv na změnu sledovaných parametrů. To má však za následek neúměrně zvýšenou spotřebu elektrické energie. Na obsah aminodusíku a celkového dusíku má však zvyšování frekvence otáčení příznivý vliv. Na základě analýzy všech získaných výsledků lze konstatovat, že optimální hodnota frekvence otáčení míchadla o průměru $d_R = 0,076$ m se pohybuje v rozsahu 500–600 min⁻¹. Z této hodnoty lze pak modelováním odvodit požadovanou frekvenci míchání pro libovolný průměr míchadla.

Při experimentálních pracích byl sledován také vliv hrubosti mletí, avšak ve všech případech byl zjištěn obdobný průběh naměřených veličin.

Přeložil Ing. L. Chládek

Literatura

- [1] LAMADE, S.: Auswahl und Auslegung emailierter Rührer für das Auswirbeln von Feststoffen in Flüssigkeit. Verfahrenstechnik, 11, 1977, s. 2

- [2] EINENKEL, W. D.: Erforderliche Drehzahl zum Suspendieren in Rührwerken, Verfahrenstechnik, **11**, 1977, s. 2
- [3] HOBLE, T.: Ueber die Erzeugung von Suspensionen. Chemische Technik, **18**, 1966, s. 11
- [4] LIEPE, F.: Probleme der Masstabsübertragung. Chemische Technik, **19**, 1967, s. 11
- [5] HEINDENREICH, E.: Vorlesungsmanuskript „Mechanische Grundprozesse“, Technische Universität Dresden
- [6] BRONSTEIN, I. N.: Taschenbuch der Mathematik für Ingenieure. B. G. Teubner-Verlagsgesellschaft Leipzig 1973

Arndt, G. - Linke, L.: Laboratorní výzkum rmutovacího procesu. Kvas. prům. **27**, 1981, č. 6, s. 125—129.

V článku jsou uvedeny výsledky experimentální práce, provedené na modelu varny Apparatenbau, Nordhausen (měřítko zmenšení 1:17). Sledován vliv frekvence otáčení míchadla na obsah extraktu, aminodusíku a celkového dusíku a viskozitu, hodnotu pH a barvu sladin, získané ze surogovaných sladů, mletých na různou hrubost. Optimální frekvence třílopatkového míchadla o průměru 76 mm se pohybovala v rozsahu 500—600 min⁻¹.

Арндт, Г. — Линке, Л.: Лабораторное исследование процесса затираания. Квас. прум. **27**, 1981, № 6, стр. 125—129.

В статье приводятся результаты экспериментальной работы проведенной на модели варочной установки Apparatenbau, Нордхаузен (масштаб уменьшения 1:17). Исследовалось влияние частоты вращения мешалки на содержание экстракта, аминокислоты и суммарного азота, вязкость, величины pH и окраску сусла, полученного из

суррогированных солодов разного типа помола. Оптимальная частота мешалки с тремя лопастями диаметром в 76 мм колебалась в пределах 500—600 мин⁻¹.

Arndt, G. - Linke, L.: Laboratory research of mashing process. Kvas. prům. **27**, 1981, č. 6, s. 125—129.

The results of experiments carried out in Brewhouse Apparatenbau (Nordhausen) modell (scale of reduction 1:17) are presented. The influence of the rotation frequency of the stirrer on the content of extract, amino-nitrogen and total nitrogen, on viscosity, pH value and colour of worts obtained from worts prepared by using adjuncts of grists of different coarseness, was followed. Optimal frequency of the three-paddle stirrer 76 mm diameter ranged from 500 to 600 rpm.

Arndt, G. - Linke, L.: Modellstudium des Maischprozesses. Kvas. prům. **27**, 1981, No. 6, S. 125—129.

In dem Artikel werden die Ergebnisse der Experimentalarbeit an dem Sudwerkmodell der Firma Apparatenbau, Nordhausen (Verkleinerungsverhältnis 1:17) angeführt. Verfolgt wurde der Einfluß der Umdrehfrequenz des Rührwerkes auf den Gehalt an Extrakt, Aminostickstoff, Gesamtstickstoff, auf die Viskosität, den pH-Wert und die Farbe der Süßwürze, zu deren Herstellung feiner oder gröber gemahlenes Malz, bzw. Surrogate verwendet wurden. Die optimale Frequenz des 3-Schaufel-Rührwerkes (Durchmesser 76 mm) bewegte sich im Bereich von 500—600 min⁻¹.