

Zkušenosti s použitím expertního systému při výrobě piva v CKT

Ing. Jaroslav VOTRUBA, CSc., MBÚ AVČR, Praha

Ing. Zdeněk ŠTĚRBÁČEK, CSc., Farmakom, České Budějovice

Ing. Jan ŠAVEL, CSc., Budweiser Budvar, České Budějovice

Ing. Petr VOLF, CSc., BCI Beverage Consulting, Hamburg

Klíčová slova: pivo, kvašení, cylindrokónické tanky, expertní systémy

663.43

Ú V O D

Velkou váhu při výrobě piva hrají, na rozdíl od speciálních kvasných výrob, spíše empirické zkušenosti a technologický instinkt personifikovaný nezastupitelnou osobností sládků. Se stoupající, nebo alespoň na vysoké výši setrvávající konzumací piva, roste zájem pivovarů o zvýšení výstavu. Jednou z dnes všude citovaných cest je zavádění cylindrokónických tanků (CKT). To je však spojeno se dvěma problémy. Prvním je možnost změny kvality piva, druhým je přesycení trhu a tedy v konečném dopadu problém konkurenční. Na druhé straně však zavádění CKT výrazně zlepšuje možnost racionálního řízení a počítačového monitorování výroby, což má přímý dopad na stabilizaci kvality piva a striktnější dodržování ekonomiky výroby.

V naší předchozí práci [1,2] jsme se zabývali matematickým modelováním kvašení piva v CKT. Vedle čistě formálních matematických modelů, nepoužitelných pro extrapolaci mimo rozsah původních hodnot, jsme formulovali novou řadu modelů, popisujících obecnější zákonitosti kinetiky a stochiometrie kvašení. Tyto modely umožňují jistou extrapolaci mimo rozsah původních hodnot. Jejich použití je z hlediska měřicí techniky a provádění dodatečných chemických analýz náročné a tudíž,

vzhledem k dalším problémům, s nimiž se musí technologové potýkat, problematické. Je jisté, že technolog v podstatě model jako takový nepotřebuje, ale že ho spíše zajímá odpověď na otázky, jak chladit CKT, aby prokvašování mladiny probíhalo co nejrychleji, aby konečná hladina diacetylu byla nízká, aby sedimentace kvasnic a tím i filtrovatelnost byla přijatelná atp. Při tom se spoléhá na svůj cit a zkušenost. Zpravidla mu přesnost odhadu pro řízení postačuje a zkušený praktik se s případným rozdílem mezi požadovanou hodnotou a realitou umí vyrovnat po svém. Každý z těchto "praktiků" má svůj osobitý přístup k řešení technologických problémů a onemocní-li, či je vystřídán někým jiným, může se to projevit ve změně kvality výrobku. Dnes se dá obdobná situace očekávat v řadě pivovarů, které se rozhodnou přejít na nové vysokokapacitní technologie využívající CKT. Vedle dořešení technických problémů, které vždy doprovázejí uvedení nových investičních celků do chodu, bude nutno se zabývat tím, jak co nejrychleji přenést technologické zkušenosti z již fungujících provozů do nových podmínek. To se dá provést i tak, že se na určitou dobu pozve technolog-expert "odjinud". Taková návštěva nemusí být, pokud se jedná o zahraničního experta, lacinou záležitostí a může také nastat případ, že potřebný člověk nebude z různých důvodů osobně k dispozici.

V této souvislosti se nabízí možnost nahradit znalost zkušeného experta umělou inteligencí. Pokud nemáme po ruce zkušeného pracovníka, je i tato cesta vítaným prostředkem, i když se přijímá dosud s určitou nedůvěrou. V tomto článku chceme na příkladu ukázat, že použití počítačového expertního systému může přinést efektivní řešení problémů, souvisejících se zaváděním CKT a to i na základě neúplných a svou povahou orientačních provozních záznamů. Pro náš demonstrační příklad jsme použili starší provozní data z pivovaru Radegast NOŠOVICE, která byla poskytnuta laskavostí zmíněného závodu jednomu z autorů [3] tohoto článku a byla již užitá v předchozích pracích [1-2].

POUŽITÍ UMĚLÉ INTELIGENCE K ŘÍZENÍ VÝROBY PIVA

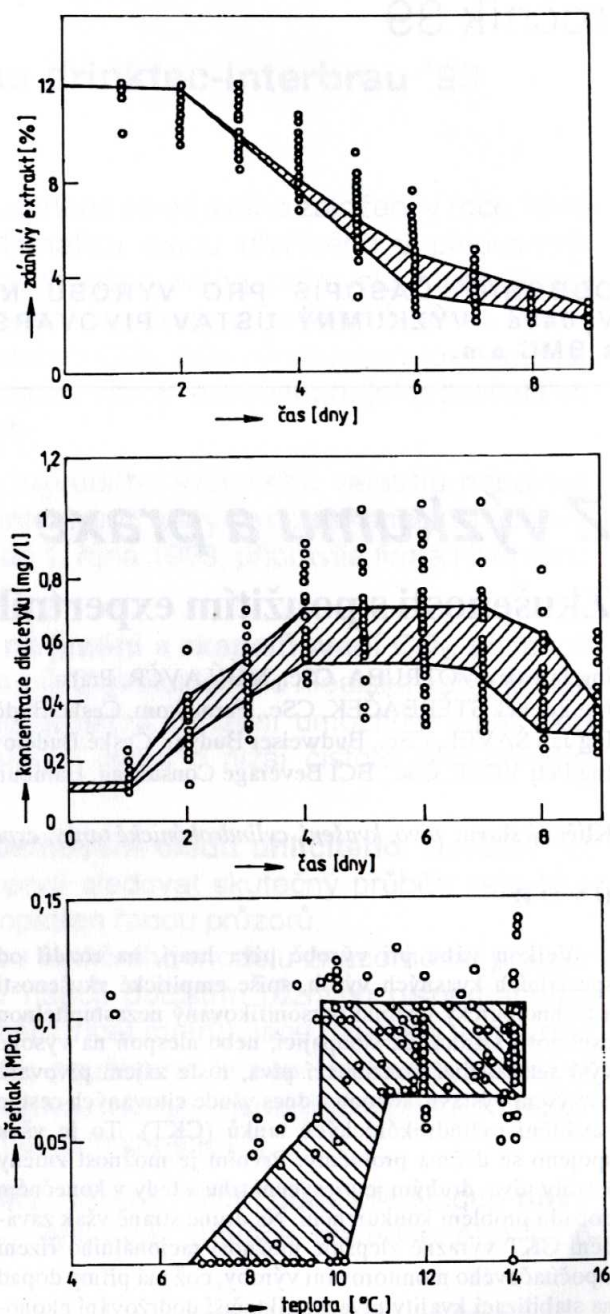
Abychom pojali tento článek prakticky, omezíme nezbytné teoretické výklady o funkci expertních systémů na minimum a odkážeme hloubavějšího čtenáře na přehlednou odbornou literaturu [4-9]. V našem případě jsme použili expertní systém LISAP (LInguistic Shell APplications), který byl původně vyvinut pro prognózování v ekologii [10], přičemž se ukázalo, že je též velmi vhodný pro analýzu průmyslových dat z technologií, které využívají mikroorganismy, jako je například výroba pekařského droždí [11] či anaerobní čištění odpadních vod [12].

LISAP je skořápka expertního systému vybudovaná na bázi fuzzy množin a lingvistické logiky. Je navržen tak, aby jeho aplikace byly co nejsnazší a zároveň aby umožnil simulovat lidské uvažování. Má schopnost používat najednou velké množství znalostí. Pracuje až s 20 proměnnými pro každý problém; z toho může být až 19 nezávislých a právě jedna závislá (proměnná, z jejíž hodnot se hledá odpověď). Přesnost systému je determinována přesností, s jakou jsou definovány proměnné. Každá proměnná může mít až 100 hodnot. Produkčních pravidel, která reprezentují "mozkovou kapacitu" expertního systému, lze zadat pro každou bázi znalostí až 9999. LISAP přijímá informaci vyjádřenou jak číselně, tak i zadanou jednoduchými slovy. Způsob zadávání vstupních údajů umožňuje spojitou změnu pravdivostní hodnoty, nebo, jak se říká v teorii fuzzy množin, stupeň náležení, od 0 do 1, místo dvou hodnot NE(=0) a ANO(=1) v klasické logice.

Činnost expertního systému je řízena čtyřmi programovými soubory. První LISMENU slouží jako manažer, editor a nápověda. Druhý VARIABM umožňuje definovat a zadat vstupní proměnné. Třetí část, KNOWM slouží k definici a zadání znalostních pravidel a jejich vah, přičemž se provádí kontrola duplicit. Konečně, program ADVISOR slouží ke generování odpovědí na zadané otázky. Programy jsou napsány v jazyce Turbo Pascal 5. Mohou být provozovány na libovolném osobním počítači typu AT/386/486/PS-20/PS-50. Doporučená konfigurace je alespoň 640 KB RAM a 20 MB HD. Čím větší je kapacita paměti a pevného disku, tím větší problémy je schopen expertní systém, založený na skořápce LISAP, řešit.

Jak si ukážeme v dalším, expertní systém používáme tak, jako bychom komunikovali s "živým expertem", to znamená, že se ho na něco ptáme. Expertní systém na naše dotazy odpovídá podobně. Na obecně formulovanou

otázku dostaneme obecnou odpověď a naopak. Totéž platí i o smyslnosti dotazu. Dokonce je možno žádat, jak jsme ukázali ve výše citované práci [12], jak "optimistickou", tak i "pragmatickou" odpověď, přičemž odpověď je odvozena ze souboru vlastních či převzatých provozních dat, která byla uspořádána do "znalostní báze".



Obr. 1a-c Souhrnné zobrazení dat použitých pro sestavení znalostní báze. Šrafované plochy vyznačují nejčastější průběhy.

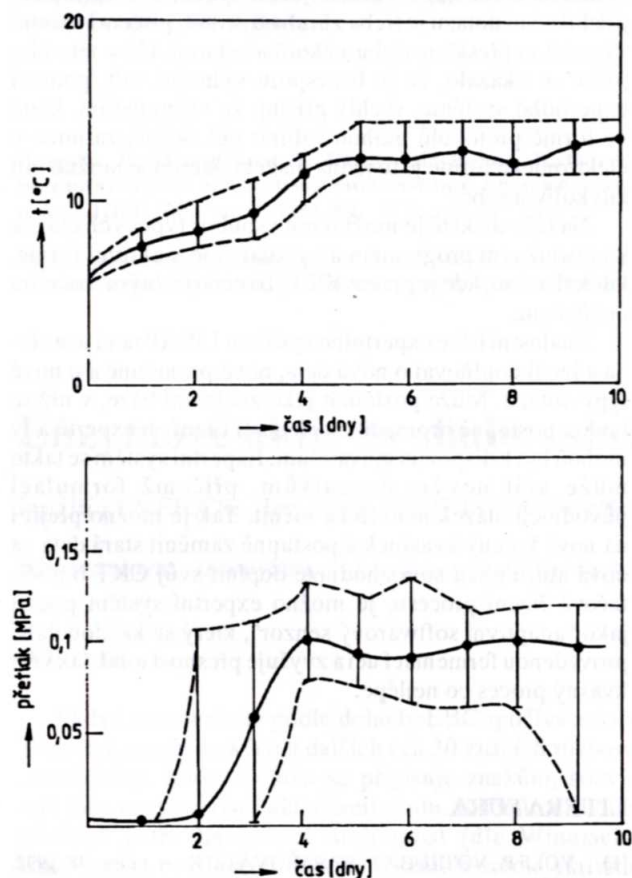
Na obrázku 1 a-c jsou shrnuta data, ze kterých jsme vycházeli. Data jsou představována jednak časovým průběhem zdánlivého extraktu a koncentrace diacetylu, jednak relací mezi teplotou a tlakem v CKT. Se zvyšující se teplotou rychlost kvašení, ale i rychlost tvorby diacetylu

stoupá. Vliv tlaku je opačný. Tyto dvě veličiny jsou ve většině případů jediné dvě stavové proměnné, jimiž můžeme proces řídit. Hranice průběhů zdánlivého extraktu a koncentrace diacetylu nám vymezují koridor, v němž můžeme tlakem a teplotou prokvašování mladiny řídit. Laický pohled na data preferuje v obou případech spodní hranici průběhů, kdy je prokvašování mladiny nejrychlejší a tvorba diacetylu nejnižší.

Proberme si nyní, jaké dotazy můžeme znalostnímu systému klást a jaké odpovědi od něj můžeme očekávat.

Dotaz typu 1.: Jak to vlastně děláte (děláme)?

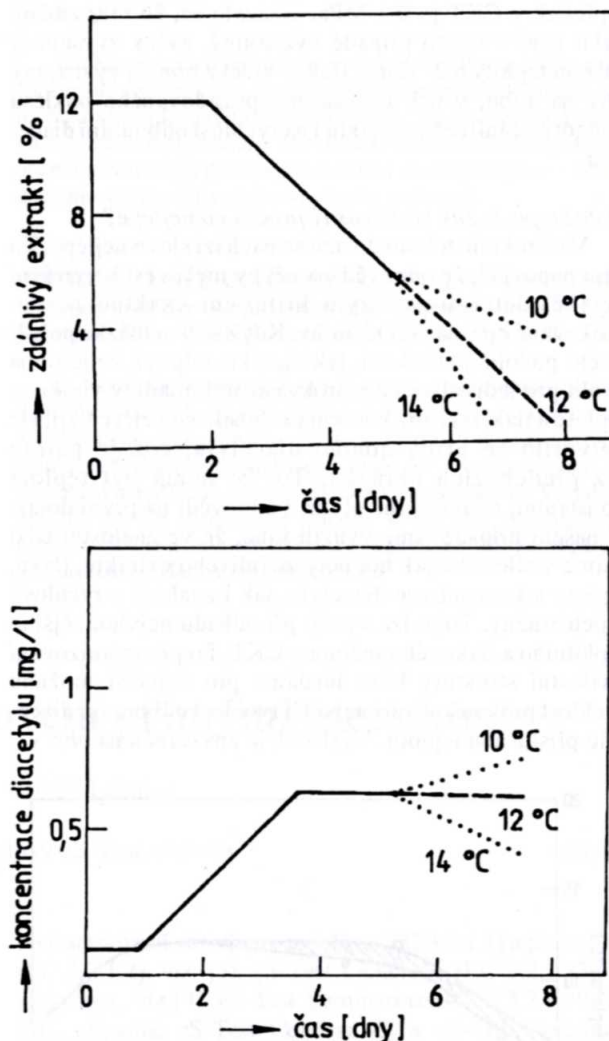
Tato otázka je velmi obecně formulována a expertní systém nám na ni logicky poskytne odpověď, která je ve "znalostní bázi" nejčastější. Člověk-expert by asi odpověděl, že "u nás je obvyklé vést kvašení mladiny tak, aby průběh zdánlivého extraktu a množství diacetylu byl v rozsahu hodnot, který je na obrázcích 1 a-c vymezen šrafovanou plochou.



Obr. 2a-b Zobrazení nejčastějšího režimu tlaku a teploty v CKT

Obsluha se obvykle snaží regulovat režim chlazení tak, aby teplota stoupala od 6 °C postupně až k hodnotě 12 °C a pak už se více méně úspěšně snaží na této hodnotě teplotu udržet (obr. 2a). Obr. 2b doplňuje informaci o tom, jak je udržován tlakový režim v CKT. Obvykle, po dobu prvních dvou dnů, je tank otevřen a přetlak v něm je téměř nulový. V druhém až třetím dni může být provedeno zahrazení CKT. Přetlak v důsledku vývinu oxidu uhličitého stoupá a pak je již regulačním ventilem s ruční či automatickou obsluhou udržován na hodnotě kolem 0,1 MPa.

Při hledání odpovědi na otázku formulovanou v záhlaví tohoto odstavce jsme použili expertní systém k tomu, aby z báze znalostí vybral soubor empirických pravidel, jimiž by se obecně měla obsluha nově spouštěného CKT řídit. Zcela jiná situace však nastane při vlastním provozu, kdy jsme si právě odečetli hodnotu tlaku, teploty a změřili "hustotu vzorku", tj. zjistili hodnotu zdánlivého resp. skutečného extraktu. Máme se rychle a pokud možno bezchybně rozhodnout, co dělat dál.



Obr. 3a-b Předpověď průběhu hodnot zdánlivého extraktu a diacetylu v závislosti na změně teploty kvašení

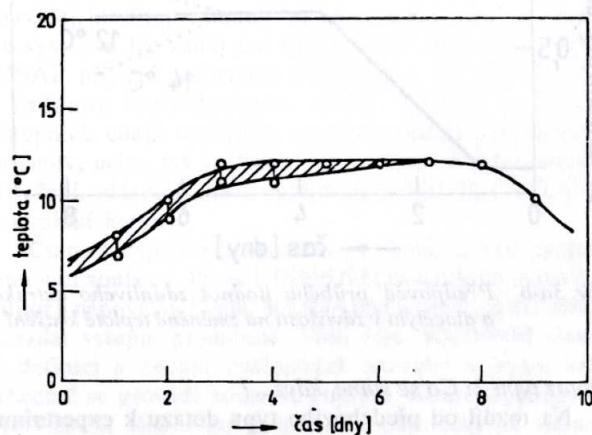
Dotaz typu 2.: Co se stane, když...?

Na rozdíl od předchozího typu dotazu k expertnímu systému, tedy na jeho znalostní bázi, vzniká tento typ otázky při přímém rozhodování o tom, jak v příštích hodinách nastavit tlakové a teplotní poměry v CKT. Zde obvykle požadujeme jistý druh krátkodobé předpovědi, maximálně na jeden až dva dny dopředu. Je důležité umět kvalifikovaně odhadnout v druhé polovině fermentace dobu, kdy z CKT "odstřelíme kvasnice" a začneme obsah tanku intenzivně chladit. Vhodně voleným režimem teploty můžeme také snížit tvorbu diacetylu, což zkrátí celkovou dobu zrání piva. Z hlediska kvality dotazů jsou otázky typu "Co se stane, když ...?" odlišné od statického pojetí dotazu

tak, jak jsme jej formulovali v předchozím odstavci. Abychom byli schopni tento problém řešit, přidali jsme do znalostní báze, již při jejím generování z provozních dat, i informace o trendech, které charakterizují dynamiku kvašení v závislosti na tlaku, teplotě a hodnotě zdánlivého extraktu. Nejlépe celý postup objasníme na příkladech. Na obr. 3 a, b jsou vyneseny předpověděné trendy průběhů hodnot zdánlivého extraktu a diacetylu, odvozené pro výchozí hodnoty zdánlivého extraktu 6% hm., diacetylu 0,6 mg/l v pátém dni kvašení. Výchozí teplota je 12 °C a přetlak v CKT je 0,1 MPa. Ukázalo se, že vliv změny tlaku není v tomto případě významný, avšak zvýšení či snížení teploty o 2 °C má, (jak je vidět z obr. 3) významný vliv na dobu, v níž je dosaženo požadovaného poklesu hodnoty zdánlivého extraktu i na rychlost odbourání diacetylu.

Dotaz typu 3: Jak vést kvasný proces co nejlépe?

Ve struktuře tohoto dotazu se nachází slovo nejlépe. To nám napovídá, že odpověď na něj by měla vést k vyřešení nějaké, deterministické kritériem exaktně nespecifikované optimalizační úlohy. Když se tato otázka položí v této podobě praktikovi, tak obvykle odpoví, že je třeba zvolit pro jednotlivé fáze prokvašování mladiny vhodnou teplotu a tlak, tak, aby kvašení probíhalo co nejrychleji, ale netvořilo se příliš mnoho diacetylu, což je patrné i z předchozích obrázků. To, že nemá být teplota konstantní, nám ostatně plyne z odpovědi na první dotaz. V našem případě jsme využili toho, že ve znalostní bázi máme vedle sebe jak hodnoty zdánlivého extraktu, tlaku, teploty a koncentrace diacetylu, tak i znalosti o rychlosti jejich změny. Toho lze využít při odhadu nejvhodnějšího teplotního a tlakového režimu v CKT. Po přeorganizování znalostní struktury báze hledáme pro největší možnou rychlost prokvašování a největší rychlost odbourání diacetylu příslušnou teplotu. Výsledek je znázorněn na obr. 4.



Obr. 4 Optimální profil teploty v CKT vyhodnocený expertním systémem LISAP

Porovnáme-li znalostně-optimální teplotní profil s teplotním profilem běžné fermentace, vidíme, že v první části fermentace by měl být vzrůst teploty strmější, poté by měla být teplota co nejpřesněji regulována na 12 °C. Mezi osmým až desátým dnem by měla být teplota proti běžnému postupu snižována až na 7 °C. Vzhledem k tomu, že rychlost kvašení daleko citlivěji reaguje na teplotu než na

tlak, je možno i nadále pracovat v režimu, který je znázorněn na obr. 2b.

Z Á V Ě R

V předchozích příkladech jsme se snažili dokázat, jaké výhody při řízení kvasného procesu v CKT může přinést soustředění zkušeností a znalostí. Uvedený příklad využívá relativně omezeného souboru dat z jednoho období z jednoho pivovaru. Skutečná báze znalostí obsahuje podstatně širší soubor informací. Přesto, jak věříme, je z uvedeného příkladu patrné, že se vyplatí neponechávat věci náhodě a mít připraven, třeba jen pro vlastní pivovar, rozhodovací poradní systém, který je schopen poradit, i když expert není přítomen. Navíc takový systém nabízí několik alternativ, čili objektivnější znalost.

Při analýze chování CKT na základě měření, která byla získána na velkokapacitních zařízeních, nám trvalo sestavení znalostní báze zhruba jeden týden. Na formulaci příslušného dotazu je třeba zhruba 5 minut, přičemž vlastní výpočet nepřesáhne dobu několika sekund. Už v této fázi práce se ukázalo, že je bezesporu výhodné mít, pomocí expertního systému, rychlý přístup ke všem datům, která ve formě protokolů mohou zabírat půl skříně, zatímco v elektronické formě je to jedna disketa, kterou je možno mít kdykoliv u sebe.

Na téže disketě je možno mít i soubor typových otázek i s obslužným programem a vyvolat si je v aktivní formě, kdekoliv tam, kde je pracoviště vybaveno běžným osobním počítačem.

Znalostní báze expertního systému LISAP není uzavřená a lze ji doplňovat o nová data, nové proměnné a o nové typy dotazů. Může posloužit jako znalostní báze, v níž se budou postupně hromadit zkušenosti různých expertů a ty mohou být k dispozici uživatelům. Expertní systém se takto může učit novým poznatkům, přičemž formulaci původních otázek není třeba měnit. Tak je možno přejít i na nové kmeny kvasinek a postupně zaměnit stará data za nová atd. Pokud se rozhodnete doplnit svůj CKT o počítačové řízení procesu, je možno expertní systém použít jako "adaptivní softwarový senzor", který se každou další provedenou fermentací učí a zvyšuje přesnost toho, jak vést kvasný proces co nejlépe.

LITERATURA

- [1] VOLF P., VOTRUBA J., BASAŘOVÁ G.: Kvas. prům., 38, 1992, s.102
- [2] VOLF P., VOTRUBA J., BASAŘOVÁ G.: Kvas. prům., 38, 1992, s.132
- [3] VOLF P.: Souhrn technologických podkladů pro řízení pivovarských procesů výpočetní technikou. (Disertační práce). VŠCHT, Praha, 1992
- [4] HAYES-ROTH F. et al.: Building Expert Systems, Addison Wesley, London, 1983
- [5] WATERMAN A.: A guide to expert systems, Addison Wesley, London, 1986
- [6] DUBOIS D., PRADE H.: Theorie des Possibilites. Masson, Paris 1989
- [7] OSUGI S., SAEKI J.: Priobretenije znanij, Mir, Moskva, 1990
- [8] DOHNAL M.: Coll. Czech. Chem. Comm. 51, 1986, s. 1027
- [9] JAKUŠ V.: Coll. Czech. Chem. Comm. 57, 1992, s.2413
- [10] ZAVÁZAL V., ŠTĚRBÁČEK Z.: Kybernetika, 28, 1992, s.78

- [11] ŠTĚRBÁČEK Z., VOTRUBA J.: An expert system applied to the control of an industrial-scale bioreactor. Chem.Engng.J, **51**,1993, s. 1335
- [12] Vu Lan HUONG, VOTRUBA J.: Engineering analysis of incomplete data from large-scale anaerobic waste water treatment by fuzzy expert system, (přijato do tisku) Coll. Czech. Chem. Comm.

*Lektoroval Prof. Ing. M.RYCHTERA, DrSc.
Do redakce došlo 15.5.1993*

VOTRUBA, J.-ŠTĚRBÁČEK, Z.-ŠAVEL, J.-VOLF, P.:
Zkušenosti s použitím expertního systému při výrobě piva
v CKT. Kvas. prům., 1993, **39**, č.9, s. 257 - 261

Byl použit expertní systém LISAP k analýze dat z provozu CKT. Na třech příkladech byly demonstrovány jeho možnosti pro prognózování a optimalizaci výroby piva pomocí teploty a tlaku v CKT. Navržený způsob umožňuje najít takové hodnoty řídicích veličin, které budou garantovat maximální rychlosti prokvašování mladiny a odbourání diacetylu.

Вотруба, Я. - Штербачек, З. - Шавел, Я. - Вольф, П.: Опыт по применению экспертной системы при производстве пива в ЦКТ. Квас. прум., 1993, **39**, № 9, стр. 257 - 261

Была применена экспертная система ЛИСАП для анализа данных по эксплуатации ЦКТ. На трех примерах демонстриро-

вались ее возможности для прогнозирования и оптимизации производства пива при помощи температуры и давления в ЦКТ. Предложенный способ позволяет найти такие значения управляющих величин, которые будут гарантировать максимальные скорости сбраживания охмеленного сусла и отщепления диацитила.

VOTRUBA, J.-ŠTĚRBÁČEK, Z.-ŠAVEL, J.-VOLF, P.: The Experiences with Expert System Application for Beer Production in Cylindro-conical Tanks. Kvas. prům., **39**, 1993, No. 9, pp. 257 - 261

We have applied the expert system LISAP to analyze plant data resulting from CCT. Three examples are presented indicating its capabilities for predicting and optimizing process parameters - temperature and pressure. The model enables to find such values of control variables that ensure maximal rates of fermentation and decomposition of diacetyl and allied compounds.

VOTRUBA, J.-ŠTĚRBÁČEK, Z.-ŠAVEL, J.-VOLF, P.: Erfahrungen mit der Applikation des Expertensystems bei der Bierproduktion in ZKT. Kvas. prům., **39**, Nr. 9, S. 257 - 261.

Es wurde das Expertensystem LISAP zur Analyse der Data aus dem ZKT-Betrieb appliziert. An drei Beispielen wurden die Möglichkeiten des getesteten Systems für die Prognose und Optimierung der Bierherstellung mittels der Temperatur und des Drucks in den ZKT demonstriert. Das vorgeschlagene Verfahren ermöglicht die Ermittlung solcher Werte der regulierbaren Größen, die die maximale Geschwindigkeit der Würzevergärung und des Diacetylabbau gewährleisten.