

FREE SURFACE EQUATION OF BEER WORT IN A ROTAPPOOL /

ECUAȚIA SUPRAFEȚEI LIBERE A MUSTULUI DE BERE ÎN ROTAPOOL

Prof. PhD. Eng. Biriș S.Șt.¹⁾, PhD. Eng. Vlăduț V.²⁾, As. PhD. Stud. Eng. Ungureanu N.¹⁾,
Lect. Ph.D. Eng. Begea M.¹⁾, As. PhD. Stud. Eng. Ionescu M.¹⁾

¹⁾ Polytechnic University Bucharest, Faculty of Biotechnical Systems Engineering / Romania

²⁾ INMA Bucharest / Romania

Tel: 0744756832; E-mail: biris.sorinstefan@gmail.com

Abstract: In this paper is presented a mathematical model that allows an analytical description of the free surface of the beer wort in a rotapool. The free surface of the beer wort in the rotapool has the equation of a rotation paraboloid. The developed mathematical model has allowed, using the Microsoft Excel program, plotting variation graphs after radial direction of the liquid height, for different supply conditions of beer wort and different typo-dimensional vessels.

Keywords: mathematical model, rotapool, free surface, beer wort, hydrodynamic process

INTRODUCTION

Beer wort boiled with hops contains hops druff in suspension and precipitates formed during wort boiling, which is called "hot trub", with particles of 30-80 μm , containing a quantity of 40-80 g d.s./hl of wort [11, 13].

The study of the wort, yeast and beer fermentation, its manufacturing technology, have been studied in numerous papers [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9] in order to determine if the new equipment can influence the flavor of beer [4], if the baker's yeast influence the formation of fungi [7] or if the wort fermentation by increased gravity has an influence on the metabolism [10, 12].

Hot trub can be separated by sedimentation, centrifugation, filtration or, more commonly, by a process of complex hydrodynamic separation in a vessel called rotapool (Fig. 1), cylindrical-shaped and closed, into which the hot wort is introduced tangentially at velocities of up to 5 m/s through a connection (nozzle) 1, located in the lower third of the vessel. The vessel body and bottom are isolated, in order to maintain a high temperature of the wort in the process of trub separation, through isolation 2.

Rezumat: În cadrul acestei lucrări, este prezentat un model matematic care permite descrierea analitică a suprafeței libere a mustului de bere în rotapool. Suprafața liberă a mustului de bere în rotapool are ecuația unui paraboloid de rotație. Modelul matematic elaborat a permis, folosind programul Microsoft Excel, trasarea graficelor de variație după direcția radială a înălțimii lichidului, pentru diverse condiții de alimentare cu must de bere și diverse typo-dimensiuni de vase.

Cuvinte cheie: model matematic, rotapool, suprafața liberă, must de bere, proces hidrodinamic

INTRODUCERE

Mustul de bere fiert cu hamei conține în suspensie borhotul de hamei și precipitate formate în timpul fierberii mustului, care poartă denumirea de "trub la cald", având particule de 30-80 μm , fiind în cantitate de 40-80 g s.u. / hl must [11, 13].

Studiul mustului, drojdiei și fermentarea berii, tehnologia de fabricare a acesteia, au fost studiate în numeroase lucrări [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9] pentru a se determina dacă echipamentele noi pot influența aroma berii [4], dacă drojdia din brutărie influențează formarea ciupercilor [7] sau ce influență asupra metabolismului o are fermentarea mustului prin gravitație ridicată [10, 12].

Trubul la cald se poate separa prin sedimentare, centrifugare, filtrare sau, cel mai adesea, printr-un procedeu de separare hidrodinamică complexă, într-un vas numit rotapool (Fig. 1), care este de formă cilindrică, închis, în care mustul fierbinte este introdus tangențial cu viteze de până la 5 m/s printr-un racord (duză) 1, situată în treimea inferioară a vasului. Corpul și fundul vasului sunt izolate, pentru a menține temperatura ridicată a mustului în procesul de separare a trubului, prin intermediul unei izolații 2.

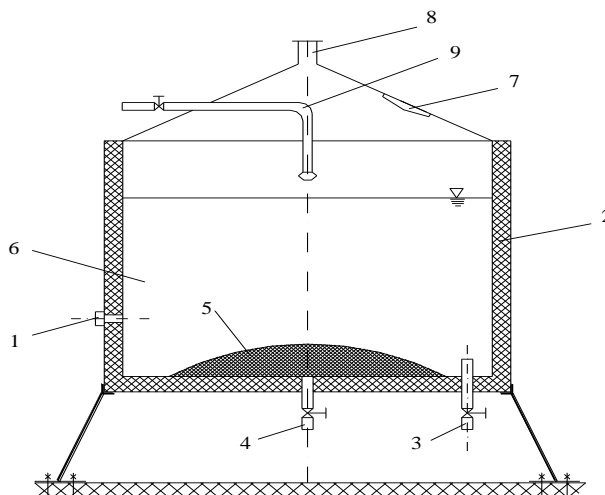


Fig. 1 – Vessel for hydrodynamic separation of hot trub from the beer wort

After 20-40 minutes, as long as it takes the separation process [11, 13], the wort is discharged through the connection 3, while trub 5 accumulated at the bottom of the vessel is discharged through the connection 4, mixed with the washing water introduced into the vessel through the connection 9. The vessel is also fitted with a basket 8 for secondary steam evacuation and a sight 7.

Due to the complex hydrodynamic process taking place in the rotapool, the free surface of beer wort is not plane, having the shape of a rotation paraboloid.

The isolation of the vessel walls must cover entirely the contact surface between wort and walls, in order to reduce heat exchange with the outside environment and to maintain a high temperature of the wort in the vessel. But, during the working process, the height of the liquid on the lateral walls increases, so, due to that fact, at present, isolation width remains constant up to the top of the vessel.

Deducting the free surface equation of the liquid in the rotapool, the maximum height of the liquid in the vessel walls can be inferred, from which the above no longer requires an isolation of the same consistency.

MATERIALS AND METHOD

The equation defining the shape of the free surface of beer wort in the rotapool can be deduced based on the following assumptions:

- the effect of beer wort viscosity is neglected;
- the velocity of beer wort is maximum near the wall, being directly proportional with the horizontal component of liquid input velocity in the vessel;
- the study refers to the final stage of trub separation process, when the volume of liquid in the vessel reaches the nominal value.

The wort is placed in the lower third of the vessel, tangential to its body, with velocity $v_1=2-5$ m/s and an angle $\alpha = 15^\circ$, supply that prints a rotation movement of the liquid in the vessel, forming upward currents in the central area of the vessel and descending currents at the periphery, transporting and depositing trub particles in the central area of the vessel bottom (Fig. 2).

După 20-40 minute, cât durează procesul de separare [11, 13], mustul este evacuat prin racordul 3, iar trubul 5 depus pe fundul vasului, este evacuat prin racordul 4, în amestec cu apa de spălare introdusă în vas prin racordul 9. Vasul mai este prevăzut cu un coș 8 pentru evacuarea aburului secundar și cu un vizor 7.

Datorită procesului hidrodinamic complex care se desfășoară în rotapool, suprafața liberă a mustului de bere nu este plană, ci este de forma unui paraboloid de revoluție.

Izolația pereților vasului trebuie să acopere întreaga suprafață de contact dintre must și pereți, pentru a reduce schimbul de căldură cu mediul înconjurător și pentru a menține temperatura ridicată a mustului în vas. Dar, în procesul de lucru, înălțimea lichidului pe pereții laterali crește și de aceea, în prezent, vasele au izolații cu aceeași grosime până la partea superioară a vasului.

Deducându-se ecuația suprafeței libere a lichidului în rotapool se va putea deduce care este înălțimea maximă a lichidului pe pereții vasului, de la care în sus nu se mai impune o izolație de aceeași consistență.

MATERIALE ȘI METODĂ

Ecuația care definește forma suprafeței libere a mustului de bere în rotapool se deduce pe baza următoarelor ipoteze:

- se neglijează efectul vâscozității mustului de bere;
- viteza mustului de bere în zona peretelui este maximă, fiind direct proporțională cu componenta orizontală a vitezei de introducere a mustului în vas;
- studiul se referă la etapa finală a procesului de separare a trubului, când volumul de lichid din vas ajunge la valoarea nominală.

Mustul este introdus în vas în treimea inferioară, tangențial la corpul acestuia, cu viteza $v_1=2-5$ m/s și sub un unghi $\alpha = 15^\circ$, alimentare care imprimă o mișcare de rotație a lichidului în vas, luând naștere curenți ascensionali la partea centrală a vasului și coborâtori la periferie, care transportă și depun particulele de trub în partea centrală a fundului vasului (Fig. 2).

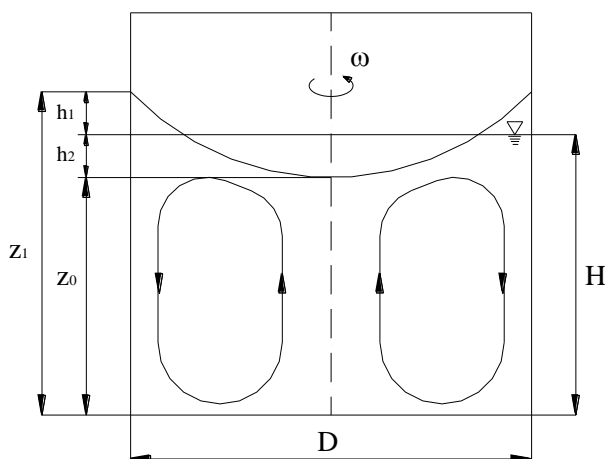


Fig. 2 – Calculus model for the free surface of the wort in the rotapool

Theoretical tangential velocity of the liquid in the vessel, on its periphery, is calculated from velocity v_1 , angle α and a decrease coefficient of the velocity in the vessel $k=0,3-0,5$, with the equation:

$$v = k \cdot v_1 \cdot \cos \alpha = R \cdot \omega \quad (1)$$

from which it results the angular velocity of the liquid in the vessel:

Viteza teoretică tangențială a lichidului în vas, la periferia acestuia, se calculează în funcție de viteza v_1 , de unghiul α și un coeficient de scădere a vitezei lichidului în vas $k=0,3-0,5$, cu relația:

din care rezultă viteza unghiulară a lichidului în vas:

$$\omega = \frac{k \cdot v_l \cdot \cos \alpha}{R} \tag{2}$$

On the free surface of the beer wort (Fig. 3) are acting the centrifugal force F_c and weight G :

Pe suprafața liberă a mustului de bere (Fig. 3) acționează forța centrifugă F_c și greutatea G :

$$F_c = m \cdot r \cdot \omega^2 \tag{3}$$

$$G = m \cdot g \tag{4}$$

with the resultant N normal to the surface (Fig. 3).

care au rezultanta N normală la suprafață (Fig. 3).

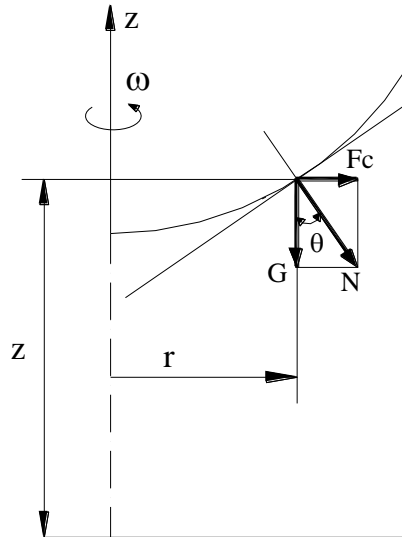


Fig. 3 – Force components

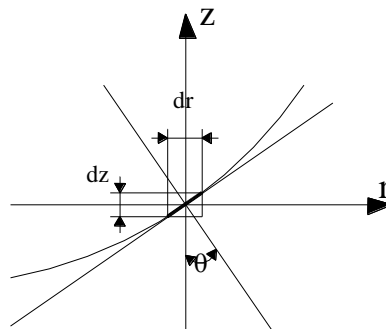


Fig. 4 – Element on the free surface of liquid

From figures 3 and 4, equation (5) can be written:

Analizând figurile 3 și 4 se poate scrie relația:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{F_c}{G} = \frac{m \cdot r \cdot \omega^2}{m \cdot g} = \frac{r \cdot \omega^2}{g} = \frac{dz}{dr} \tag{5}$$

Considering that the velocity distribution is linear:

Considerând distribuția de viteze liniară:

$$v = r \cdot \omega \tag{6}$$

it results:

rezultă:

$$dz = \frac{r \cdot \omega^2}{g} \cdot dr \tag{7}$$

By integrating relation (7) it results:

Prin integrarea relației (7) rezultă:

$$\int dz = \int \frac{r \cdot \omega^2}{g} \cdot dr = \frac{\omega^2}{g} \cdot \int r \cdot dr \tag{8}$$

respectively:

respectiv:

$$z - z_0 = \frac{r^2 \cdot \omega^2}{2 \cdot g} \tag{9}$$

so the free surface equation of the beer wort in the rotapool has the following form:

din care rezultă ecuația suprafeței libere a mustului de bere în rotapool sub forma:

$$z = z_0 + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot r^2 \tag{10}$$

equivalent to the equation:

care este echivalentă cu ecuația:

$$z = z_0 + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot (x^2 + y^2) \tag{11}$$

z_0 can be deduced from the following conditions:

Valoarea z_0 se deduce punând condițiile:

$$r = R \Rightarrow z = H + h_1 = z_0 + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} \cdot R^2 \tag{12}$$

$$r = 0 \Rightarrow z = z_0 = H - h_2 \tag{13}$$

$$h_1 = h_2 \tag{14}$$

it results:

din care rezultă:

$$z_0 = H - \frac{\omega^2}{4 \cdot g} \cdot R^2 \tag{15}$$

Given the relation (15), equations (10) and (11) will have the final form:

Ținând cont de relația (15), ecuațiile (10) și (11) vor avea forma finală:

$$z = H - \frac{\omega^2 \cdot R^2}{4 \cdot g} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{r^2}{R^2} \right) \tag{16}$$

$$z = H - \frac{\omega^2 \cdot R^2}{4 \cdot g} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{x^2 + y^2}{R^2} \right) \tag{17}$$

RESULTS

The mathematical model developed in this paper has allowed obtaining data which were processed in Microsoft Excel and plotting variation graphs after radial direction of the height of the points on the free surface of beer wort, for various supply conditions of beer wort and various typo-dimensional vessels.

Three different vessels were studied, with diameters of 3 m, 2 m and 1 m, for which, in all cases, the liquid height H was 1 m. The liquid input velocity in the vessel was 3m/s, 4 m/s and 5 m/s.

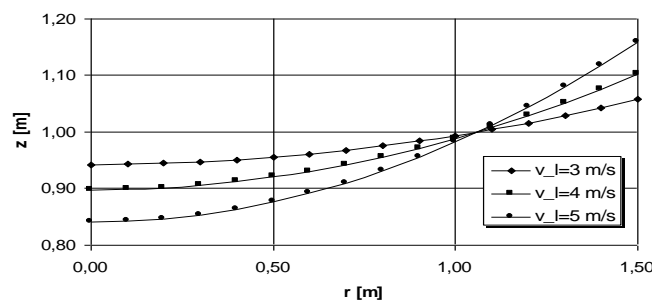
Variations in liquid height after radial direction in the three vessels, for three different input velocities of beer wort in the rotapool, are shown in figures 5 and 6.

REZULTATE

Modelul matematic elaborat în cadrul prezentei lucrări a permis obținerea unor date care au fost prelucrate în Microsoft Excel și au permis trasarea graficelor de variație după direcția radială a înălțimii punctelor de pe suprafața liberă a mustului de bere, pentru diverse condiții de alimentare cu must de bere și diverse typo-dimensiuni de vase.

Au fost studiate trei vase diferite, având diametru de 3m, 2 m și 1 m, la care, în toate cazurile, înălțimea H a lichidului a fost de 1 m. Viteza de introducere a lichidului în vas a fost de 3 m/s, 4 m/s și 5 m/s.

Variația înălțimii lichidului după direcția radială în cele trei vase studiate, pentru cele trei viteze diferite de introducere a mustului de bere în rotapool, este prezentată în figurile 5 și 6.



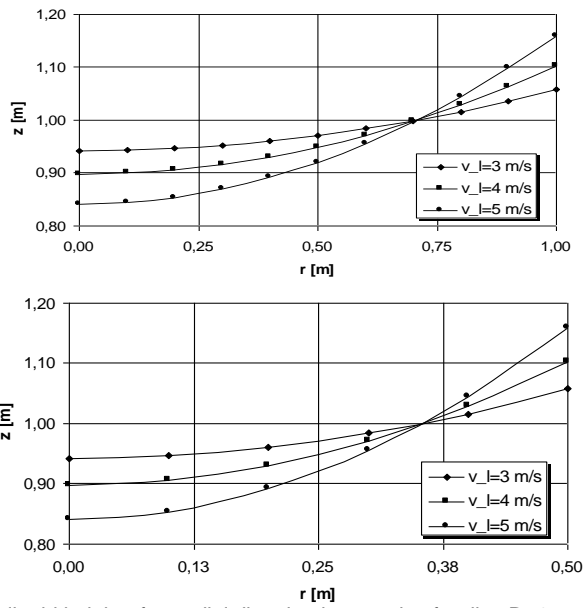


Fig. 5 – Variation in liquid height after radial direction in vessels of radius $R=1,5$ m, $R=1$ m, $R=0,5$ m, for three velocities v_1

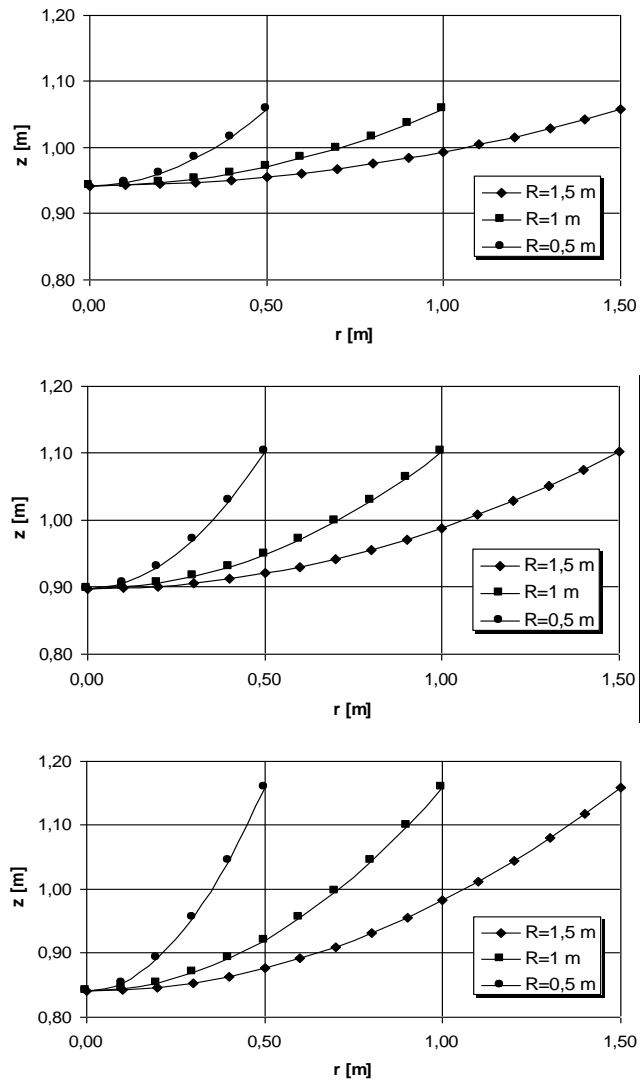


Fig. 6 – Variation in liquid height after radial direction, after entering the vessel with velocities $v_1=3$ m/s, $v_1=4$ m/s, $v_1=5$ m/s, for three radius R

CONCLUSIONS

The free surface equation of beer wort in the rotapool, deduced in this paper, has the expressions (16), respectively (17), representing a rotation paraboloid.

Figures 5 and 6 show that regardless of the vessel diameter, for the same liquid height H and the same liquid input velocity in the vessel v_l, the maximum beer wort height in the rotapool is the same.

REFERENCES

- [1]. Boulton C, Quain DE. (2001) - *Brewing yeast and fermentation*, Oxford: Blackwell Science Ltd.;
- [2]. Briggs D.E., Chris A. Boulton, Peter A., Stevens B. and Stevens R. (2004) - *Brewing Science and Practice*, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England;
- [3]. Kiselev P.G., (1988) - *Directory for hydraulic calculations*, Technical Publishing House, Bucharest.
- [4]. Meilgaard M. (2001) - *Effects on flavour of innovations in brewery equipment and processing: A review*, Journal of The Institute of Brewing 107:271–86;
- [5]. Narziß L., (1980) - *Technologies brewing*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [6]. Pădureanu V. (2001) - *Equipment for brewing*, "Transilvania" University Brasov Publishing;
- [7]. Reynolds TB, Fink GR. (2001) - *Baker's yeast, a model for fungal biofilm formation*, Science 291:878–81;
- [8]. Rus, Fl. (2001) - *Separation operations in the food industry*, Editura Universității Transilvania, Brașov;
- [9]. Rus, Fl. (2001) - *Bazele operațiilor din industria alimentară*, "Transilvania" University Brasov Publishing;
- [10]. Stewart GG. (2001) - *Fermentation of high gravity worts – its influence on yeast metabolism and morphology*, Proceedings European Brewery Convention Congress, Chapter 36;
- [11]. Stroia I., Biriș S.Șt., Begea M., (1998) - *Equipment for malt and beer*, CISON Publishing House, Bucharest;
- [12]. Verstrepen KJ, Derdelinckx G, Verachttert H, Delvaux FR. (2003) - *Yeast flocculation: what brewers should know*, Applied Microbiology and Biotechnology 61:197–205;
- [13]. *** (1999) - *Handbook of Food Engineer*, Vol. 2, Technical Publishing House, Bucharest.

CONCLUZII

Ecuția suprafeței libere a mustului de bere în rotapool, dedusă în cadrul prezentei lucrări, are expresia (16) respectiv (17), reprezentând un paraboloid de rotație.

Din figurile 5 și 6 rezultă că indiferent de diametrul vasului, pentru aceeași înălțime H a lichidului și aceeași viteză de introducere a lichidului în vas v_l, înălțimea maximă a mustului de bere în rotapool este aceeași.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Boulton C, Quain DE. (2001) - *Drojdia și fermentarea berii*, Oxford: Blackwell Science Ltd.;
- [2]. Briggs D.E., Chris A. Boulton, Peter A., Stevens B. and Stevens R. (2004) - *Știința și practica fabricării berii*, Editura Woodhead Limited, Abington Hall, Abington, Cambridge CB1 6AH, England;
- [3]. Kiselev P.G., (1988) - *Îndreptar pentru calcule hidraulice*, Editura Tehnică, București.
- [4]. Meilgaard M. (2001) - *Efectele asupra aromelor ale inovațiilor în echipamentele și procesarea berii: O sinteză*, Jurnalul Institutului de Bere 107:271–86;
- [5]. Narziß L., (1980) - *Tehnologii de fabricare a berii*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- [6]. Pădureanu V. (2001) - *Utilaje pentru fabricarea berii*, Editura Universității "Transilvania" Brașov;
- [7]. Reynolds TB, Fink GR. (2001) - *Drojdia din brutării, un model pentru formarea ciupercilor biofilm*, Știință 291:878–81;
- [8]. Rus, Fl. (2001) - *Operații de separare în industria alimentară*, Editura Universității Transilvania, Brașov;
- [9]. Rus, Fl. (2001) - *Bazele operațiilor din industria alimentară*, Editura Universității Transilvania, Brașov;
- [10]. Stewart GG. (2001) - *Fermentarea mustului prin gravitație ridicată – influența sa asupra metabolismului și morfologiei drojdiei*, Lucrările Convenției Congresului European de fabricare a berii, Capitol 36;
- [11]. Stroia I., Biriș S.Șt., Begea M., (1998) - *Utilaje pentru industria malțului și a berii*, Editura CISON, București;
- [12]. Verstrepen KJ, Derdelinckx G, Verachttert H, Delvaux FR. (2003) - *Floculația berii: ce trebuie să știm despre fabricarea berii*, Microbiologie și biotehnologie aplicată 61:197–205;
- [13]. *** (1999) - *Manualul inginerului de industrie alimentară*, Vol. 2, Editura Tehnică, București.