КОМБИНОВАНИ ДИЈАГРАМ ЗА СИСТЕМ ВЛАЖАН МАТЕРИЈАЛ–ОКОЛИНА

COMBINED DIAGRAM OF THE WET MATERIAL–SURROUNDINGS SYSTEM

Проф. др Радивоје М. Топић, дипл. инж.,
Машински факултет, Београд

У раду се приказује општа метода дефинисања комбинованог дијаграма за истосмерни и супротносмерни ток агенса сушења и материјала у процесу сушења, користећи изотерме сорпције (термодинамичке равнотеже) за конкретан материјал и Кришерову једначину за дефинисање везе влаге. За конкретан материјал су дефинисани комбиновани дијаграми, уз претходно одређивање енергије везе влаге за влажан материјал.

The paper deals with the general method of defining the combined diagram of one-direction and opposite-direction drying agent flow and material in drying process, using the sorption isotherm (of thermodynamic balance) for concrete material and Krischer's equation for defining the moist link. For concrete material, the combined diagrams are defined, with preliminary determining the wet material moist link energy.

Кључне речи: сушење; влажан ваздух; дијаграм за влажан ваздух; дијаграм за влажан материјал

Key words: drying; humid air; humid air diagram; wet material diagram

Увод

Даљи корак ка повезивању параметара влажног материјала са променама параметара агенса сушења у току процеса сушења је дефинисање комбинованог дијаграма за влажан материјал и агенс сушења. Тако се приликом разматрања процеса сушења уместо дијаграма h_v–x за агенс сушења и h_m–u дијаграма за влажан материјал, може користити комбиновани дијаграм добијен њиховим обједињавањем.

1. Општа метода за дефинисање комбинованог дијаграма

Комбиновани дијаграм се дефинише сходно чињеници да се промене стања влажног материјала у h_m–u и промене стања агенса сушења у h_v–x дијаграму међусобно поклапају, захваљујући томе што је однос размере на једном и другом дијаграму једнак односу протока материјала и агенса сушења у процесу сушења.

Примена комбинованог дијаграма се може анализирати на примеру дејства (размене топлоте и материје), протока влажног материјала $\dot{m}_s \cdot (1 +$

u) и влажаног ваздуха $\dot{L} \cdot (1 + x)$. За бесконачно мали временски интервал протоци влаге и топлоте су:

$$d\dot{q} = \dot{m}_s \cdot dh_m = -\dot{L} \cdot dh_v \tag{1}$$

$$d\dot{m}_w = \dot{m}_s \cdot du = -\dot{L} \cdot dx \tag{2}$$

Међусобним дељењем ових једначина, добија се да је:

$$\frac{dh_m}{du} = \frac{dh_v}{dx} \tag{3}$$

а то значи да је однос промене енталпије и промене влажности за материјал и влажан ваздух једнак.

На комбинованом дијаграму потребно је пронаћи стање у којем су температуре и релативне влажности агенса сушења и влажног материјала једнаки међу собом. То је тачка која карактерише стање којем теже агенс сушења и материјал при бесконачном трајању процеса сушења. Између стања материјала и агенса сушења на почетку процеса сушења и стања термодинамичке равнотеже, могу се поставити две карактеристичне линије и то:

– линија једнаких температура материјала и агенса сушења $\theta = t$,

– линија једнаких релативних влажности материјала и агенса сушења $\varphi_m = \varphi_v$.

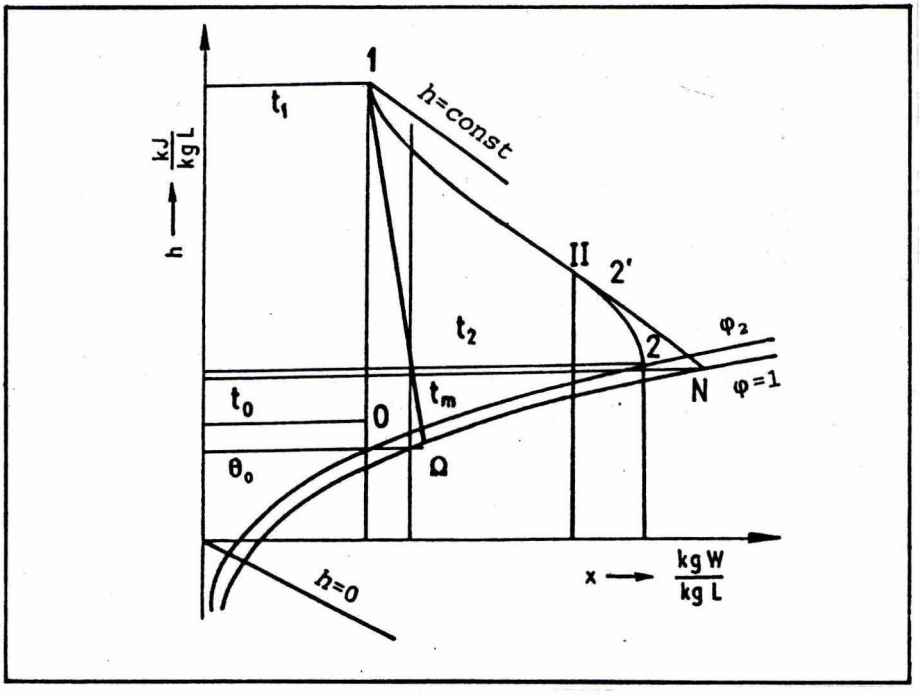
Крива промене параметара материјала и агенса сушења између почетног стања 1 и стања термодинамичке равнотеже 2 пролази ближе линији $t = \Theta$, јер је температурска проводност влажног материјала знатно већа од проводности влаге.

1.1. Истосмерни ток материјала и агенса сушења

При истосмерном току материјала и агенса сушења процес сушења (сл. 1) се одвија по линијама: 0-1 загревање агенса сушења; 1–I период загревања влажног материјала; I–II период константне брзине сушења; II–2 период опадајуаће брзине сушења.

У сушару улази загрејан агенс сушења температуре t_1, минималне релативне влажности φ_1, са материјалом највеће апсолутне влажности u_o и минималне температуре Θ_O. Из сушаре излази агенс сушења максималне релативне влажности $\varphi_2 > \varphi_1$ и минималне температуре t_2 са материјалом максималне температуре Θ_2 и минималне влажности u_2.

У идеалном случају сушење би требало да се заврши у тачки 2, у којој се између материјала и агенса сушења успоставља термодинамичка равнотежа, то јест када се температура t_2 и парцијални притисак излазаног агенса сушења p_{d2}, изједначе са температуром материјала Θ_2 и притиском паре над материјалом p_{dF2}. Пошто у тачки 2 постоји опасност од кондензације паре агенса сушења, то се сушење зауставља нешто раније у тачки 2′ где је влажност материјала нешто већа него у тачки 2.



Слика 1. Приказ процеса сушења

Задајући вредност t_2 и φ_2, на h_v–x дијаграму налази се тачка 2, а затим и x_2 и h_{v2}. Остале тачке на дијаграму одређују се из једноставних једначина биланса влаге и енталпија, за познате вредности: почетне температуре и релативне влажности агенса сушења t_0, φ_0, почетне температуре материјала θ_0, протока апсолутно сувог материјала $\dot{m}_s$, почетне и крајње влажности материјала t_0, $u_{2'}$.

Из једначине биланса влаге:

$$\dot{m}_s \cdot \left(u_0 - u_2\right) = \dot{L} \cdot \left(x_2 - x_0\right) \tag{4}$$

одређује се проток агенса сушења.

Вредност енталпије h_{v1} која дефинише стање 1, се одређује из биланса енталпија:

$$\dot{m}_s \cdot \left(h_{m2} - h_{m0}\right) = \dot{L} \cdot \left(h_{v1} - h_{v2}\right) \tag{5}$$

Тачка II, у којој се завршава период константне брзине сушења, лежи на изотерми мокрог термометра t_m.

Из једначине биланса влаге:

$$\dot{m}_s \cdot \left(u_0 - u_{II}\right) = \dot{L} \cdot \left(x_{II} - x_0\right) \tag{6}$$

где је $u_{II} = u_{kr1}$, се одређује апсолутна влажност x_{II} а затим на линији t_m = конст тачка II.

На исти начин из једначине биланса влаге:

$$\dot{m}_s \cdot \left(u_0 - u_{2'}\right) = \dot{L} \cdot \left(x_{2'} - x_0\right) \tag{7}$$

се одређује апсолутна влажност $x_{2'}$, која дефинише крајњу тачку 2′ и крајњу температуру $t_{2'}$.

На крају из једначине:

$$\dot{m}_s \cdot \left(C_{m1} \cdot \theta_1 - c_{mI} \cdot \theta_I\right) = \dot{L} \cdot \left(h_{v1} - h_{vI}\right) \tag{8}$$

где је: $\Theta_1 = \Theta_0$, $\Theta_I = t_m$, налази се енталпија h_{vI}, која дефинише тачку I.

Крива 1–I се повлачи тангентно на праву 1–Ω (где Ω представља почетно стање паре над материјалом, тако да се у почетку образује смеша пара стања 1 и Ω).

Управо једначине које дефинишу биланс влаге:

$$x_2 - x_1 = \frac{\dot{m}_s}{\dot{L}} \cdot \left(u_0 - u_2\right) \tag{9}$$

и биланс енталпија:

$$h_{v1} - h_{v2} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{L}} \cdot \left(h_{m2} - h_{m0}\right) \tag{10}$$

потврђују могућност обједињавања h_v–x дијаграма за агенс сушења са h_m–u дијаграмом за влажан материјал, узимајући да је однос размера h_m–u дијаграма и h_v–x дијаграма једнак односу ($\dot{m}_s / \dot{L}$).

Комбиновани дијаграм за процес сушења при истосмерном току материјала и агенса сушења црта се тако што се h_m–u дијаграм нацрта посебно повећањем размере истог у односу ($\dot{m}_s / \dot{L}$), а затим преклопи преко h_v–x дијаграма. Апсциса мора бити постављена паралелно линији h = конст изнад тачке 1 за величину ($\dot{m}_s / \dot{L}$) · h_{m0} и представља $h_m = 0$. Ордината се поставља вертикално наниже на растојању ($\dot{m}_s / \dot{L}$) · u_0 од исте тачке 1. Ове осе се секу у тачки 0′, која представља нови координатни почетак. Вредности ($\dot{m}_s / \dot{L}$) · u се наносе улево по хоризонтали повучене кроз тачку 0′. Свака тачка у дијаграму истовремено карактерише стање материјала и агенса сушења.

Тачка равнотеже у којој се температура и влажност материјала изједначавају са температуром и влажношћу агенса сушења, може се одредити као тачка пресека линије геометријског места тачака пресека линија једнаких температура t = Θ агенса сушења и материјала, и линије коју чине геометријско место тачака пресека линија једнаких релативних влажности агенса сушења и материјала $\varphi_v = \varphi_m$.

1.2. Супротносмерни ток материјала и агенса сушења

При супротносмерном току, материјал и агенс сушења крећу се у супротним смеровима.

Комбиновани дијаграм при супротносмерном току материјала и агенса сушења црта се слично комбинованом дијаграму при истосмерном току материјала и агенса сушења. Апсцисна оса се наноси испод тачке 1, за величину $(\dot{m}_s / \dot{L}) \cdot h_{mk}$ или испод тачке 2, за величину $(\dot{m}_s / \dot{L}) \cdot h_{m0}$ паралелно линији h = конст. Ординатна оса наноси се улево од тачке 1, на растојању $(\dot{m}_s / \dot{L})$. У пресеку ових оса добија се нови координатни почетак 0′.

Очигледно је да је за дефинисање комбинованог дијаграма неопходно дефинисати енталпију влажног материјала, што захтева дефинисање енергије везе влаге са скелетом влажног материјала.

2. Кришерова једначина за одређивање енергије везе влаге са влажним материјалом

У литератури постоји више једначина за одређивање топлоте испаравања везане влаге и енергије везе влаге, као што су једначине: Clausius--Clapeyrona, Otmera i Krischera. Заједничко за ове три једначине је да се сувозасићена водена пара сматра идеалним гасом.

За стање равнотеже, течности и водене паре, могуће је написати диференцијалну једначину:

$$v_d \cdot dp_{du} = v_w \cdot dp_w \tag{11}$$

где је p_w притисак течне фазе, јер је у процесу сушења течна фаза у влажном материјалу изложена истезању, а v_d и v_w су специфичне запремине паре и течности.

Уколико се, како је и раније наглашено, претпостави да се пара понаша као идеалан гас, што је могуће учинити за двофазни систем пара--течност при температурама при којима је притисак парне фазе релативно мали, могуће је написати да је:

$$v_d = \frac{R_d \cdot T}{p_{du}} \tag{12}$$

и уношењем израза (12) у израз (11) добија се:

$$\frac{dp_{du}}{p_{du}} = d \ln p_{du} = \frac{v_w \cdot dp_w}{R_d \cdot T} \tag{13}$$

Спољни притисак се мења од 0 до p_w, а притисак паре од p_{du} до p_d, па се после интеграције израза (13) у наведеним границама добија:

$$\ln \frac{p_d}{p_{du}} = \frac{p_w \cdot v_w}{R_d \cdot T} \tag{14}$$

или у облику:

$$\ln \frac{p_{du}}{p_{d'}} = \ln \varphi = -\frac{p_w \cdot v_w}{R_d} \tag{15}$$

Диференцирањем израза (15) по 1/T, уз претпоставку да је влажност материјала константна, производ $p_w \cdot v_w$ не зависи од температуре, добија се:

$$\left[\frac{d\left(\ln \frac{p_{du}}{p_{d'}}\right)}{d\left(\frac{1}{T}\right)}\right]_{u=const.} = -\frac{p_w \cdot v_w}{R_d} \tag{16}$$

Производ $p_w \cdot v_w$, према Кришеру, представља енергију везе влаге са материјалом, па је:

$$\left[\frac{d\left(\ln \frac{p_{du}}{p_{d'}}\right)}{d\left(\frac{1}{T}\right)}\right]_{u=const.} = -\frac{\Delta r}{R_d} \tag{17}$$

3. Комбиновани дијаграм за дати материјал

Да би се дефинисао комбиновани дијаграм за влажан материјал и агенс сушења, потребно је познавати одређене параметре материјала и агенса сушења на почетку и на крају процеса сушења. У ствари, мора се поћи од конкретног примера процеса сушења. У овом раду је дијаграм за сушење кромпира у високотемпературској сушари.

За одређивање енергије везе влаге, помоћу Кришерове методе, користе се изотерме сорпције за дати материјал (кромпир). Ако се помоћу изотерми сорпције за константну вредност релативне влажности Кришерова једначина представи графички у координантном систему "1/T – lnφ", добијају се праве линије, изостере, линије константне апсолутне влажности. Енергија везе влаге са материјалом добија се множењем вредности нагиба изостере са вредношћу гасне константе за водену пару $R_d = 462$ J/kgK.

Методом најмањих квадрата, одређена је аналитичка зависност енергије везе влаге са материјалом од апсолутне влажности материјала:

$$\Delta r = \frac{8{,}7791}{(u + 0{,}1)^{2{,}6674}} \tag{18}$$

Коришћењем израза за енталпију влажног материјала:

$$h_m = c_{sm} \cdot \Theta + c_w \cdot u \cdot \Theta + \int_u^{\infty} \Delta r \cdot du \qquad (19)$$

и познатих вредности за:

– специфични топлотни капацитет апсолутно сувог материјала c_{sm} = 2,5 kJ/kgK,

– специфични топлотни капацитет воде c_w = 4,187 kJ/kgK,

– вредност енергије везе влаге са материјалом, добија се коначни облик израза за енталпију влажног материјала:

$$h = 2{,}5 \cdot \Theta + 4{,}\ 187 \cdot u \cdot \Theta + \frac{5{,}2651}{(u+1)^{1{,}6674}} \qquad (20)$$

На основу дефинисаног h_m–u дијаграма за кромпир, који се не приказује у раду, h_v–x дијаграма за влажан ваздух и параметра материјала и ваздуха, на основу којих се постављају једначине материјалног и енергетског биланса, дефинисан је комбиновани дијаграм за разматрани материјал и влажан ваздух при истосмерном и супротносмерном току материјала и агенса сушења.

3.1. Истосмерни ток агенса сушења и влажног материјала

За индиректни начин сушења и истосмерни ток агенса сушења и влажног материјала, дефинисано је:

– на улазу у сушару:

– стање ваздуха (агенса сушења), (t_1 = 300°C; x_1 = 0,004 kgW/kgL),

– стање материјала (Θ_O = 17°C, u_O = 2,8 kgW/kg m_s),

– на излазу из сушаре:

– стање ваздуха (t_2 = 100°C, x_2 = 0,075 kgW/kgL),

– стање материјала (Θ_2 = 35,3°C, u_2 = 0,13 kgW/kgm_s),

– стање околине: (t_0 = 15°C, x_0 = 0,04 kgW/kgm_s).

Да би се нацртао дијаграм изнад стања влажног ваздуха 1 дефинисаног апсолутном влажношћу и температуром (сл. 2), на растојању $(\dot{m}_s/\dot{L}) \cdot h_{m2}$ = 6,45 kJ/kL наноси се апсцисна оса паралелно линији h_v = конст, где је h_{mo} енталпија влажног материјала на почетку сушења, дефинисана изразом (19).

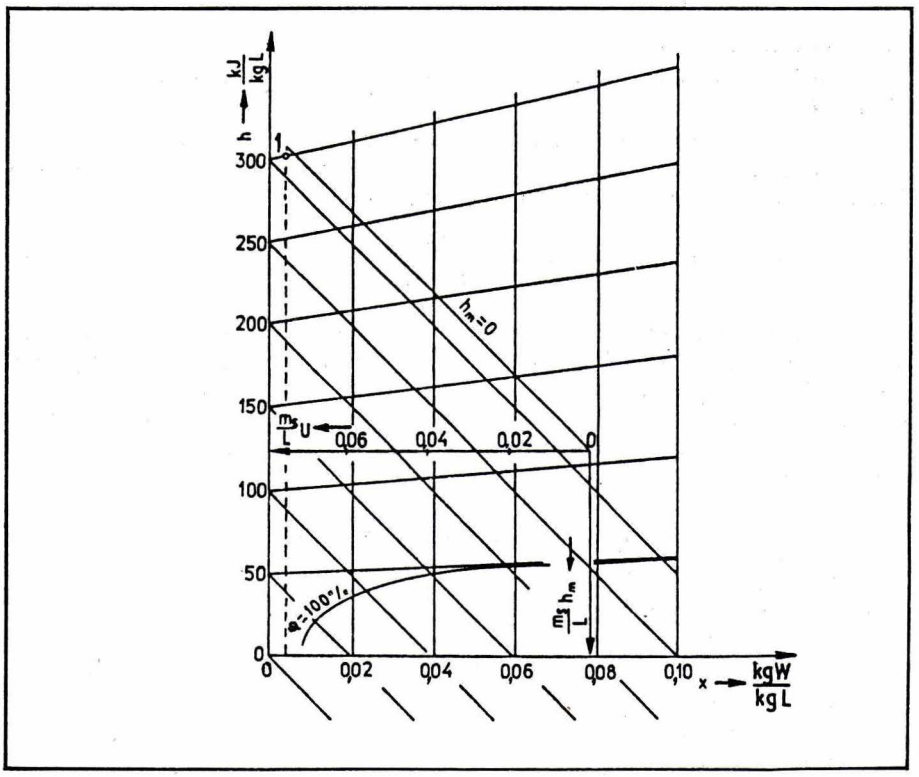
Ординатна оса се наноси вертикално наниже од тачке 1 на растојању $(\dot{m}_s/\dot{L}) \cdot u_0$ = 0,0744 kgW/kgL.

Ове осе се секу у тачки 0′, која представља нови координатни почетак. Кроз тачку 0′ наносе се улево по хоризонтали вредности $(\dot{m}_s/\dot{L}) \cdot u$.

3.2. Супротносмерни ток агенса сушења и влажног материјала

За исте параметре околине, агенса сушења и материјала индиректни начин сушења и супротносмерни ток агенса сушења и материјала, нацртан је комбиновани дијаграм тако што се испод стања влажног ваздуха 1, де-

фиксаног апсолутном влажношћу и температуром (сл. 3) на растојању $(\dot{m}_s/\dot{L}) \cdot h_{m2} = 6{,}2$ kJ/kL наноси апсцисна оса паралелно линији $h_v = 0$, где је h_{m2} енталпија влажног ваздуха на излазу из сушаре.

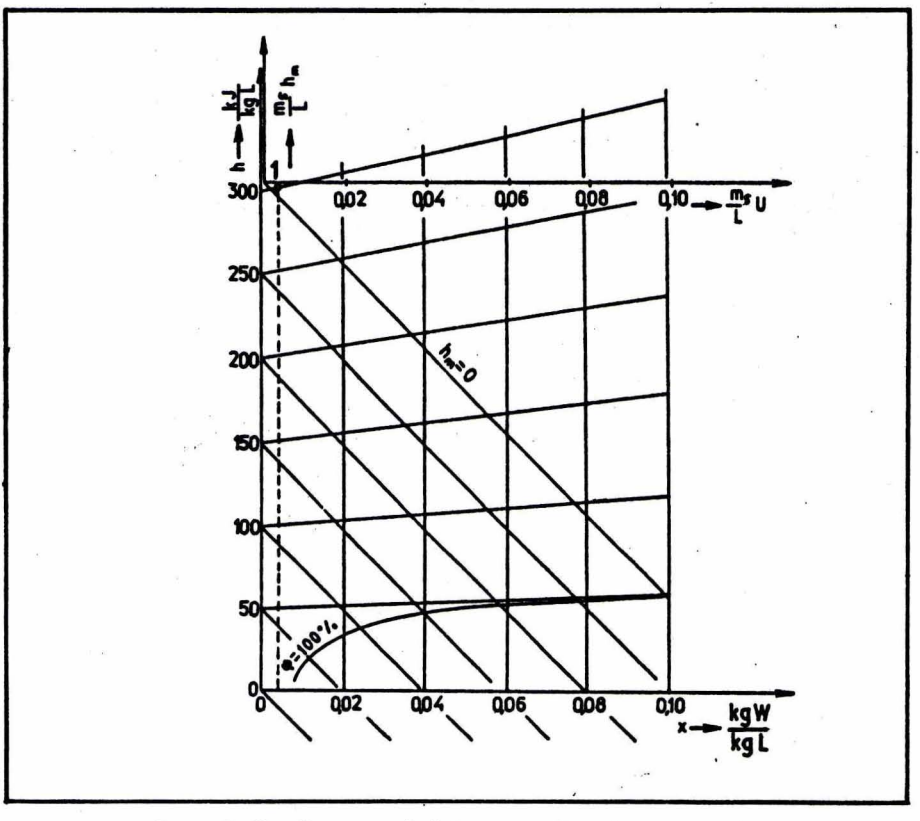


Слика 2. Комбиновани дијаграм за истосмерни ток

На растојању $(\dot{m}_s/\dot{L}) \cdot u_2 = 0{,}0035$ kgW/kgL у лево од тачке 1, наноси се ординатна оса вертикално навише. Ове осе секу се у тачки 0′ која представља нови координатни почетак. Кроз тачку 0′ наносе се удесно по хоризонтали вредности $(\dot{m}_s/\dot{L}) \cdot u$. Према изложеној општој методи за дефинисање комбинованог дијаграма, могуће је дефинисати и остала стања и периоде сушења на дијаграму.

4. Закључак

Уместо дијаграма h_v–x за влажан ваздух, који се у пракси најчешће користи за приказивање и прорачун различитих начина процеса сушења, примена h_u–u дијаграма за влажан материјал, а нарочито примена комбинованог дијаграма, значила би велики напредак за анализу процеса сушења.



Слика 3. Комбиновани дијаграм за супротносмерни ток

Дијаграм стања за влажан материјал (чија израда претходи дефинисању комбинованог дијаграма) представља значајан корак у повезивању својстава материјала и агенса сушења за време процеса сушења, односно у повезивању графо-аналитичког прорачуна процеса сушења са статиком и кинетиком процеса сушења.

Предност комбинованог дијаграма је у томе што свака тачка у дијаграму истовремено карактерише термичко стање агенса сушења и влажног материјала. Уношењем одређеног стања агенса сушења у дијаграм, директно се могу очитати и одговарајуће вредности параметара влажног материјала.

5. Литература

[1] **Горјачкин, В. П.:** *Собрание сочињењиј*, том 3, "КОЛОС", Москва, 1968.

[2] **Топић, М. Р.:** *Основе пројектовања прорачуна и конструисања сушара*, "Научна књига", Београд, 1989.

[3] **Малтри, В., Петке, Е., Шнајдер, Б.:** *Сушилниње установки сељскохозјајственова назначенија,* "Машиностројеније", Москва, 1979.
[4] **Валушис, В. Ј.:** *Основи високотемпературној сушки кормов,* "КОЛОС", Москва, 1977.
[6] **Бурич, О., Берски, Ф.:** *Сушка плодов и овошћеј,* "Пишћевија промишљеност", Москва, 1978.
[7] **Гинзбург, А. С.:** *Основи теорији и техники сушки пишћевих продуктов,* "Пишћевија промишљеност", Москва, 1973.