

Сушаре Теорија и задаци

Сушаре

Теорија и задаци

Обрадовић Марко
Јововић Александар
Каран Миленко
Ђурић Славко
Радић Дејан

Станојевић Мирослав
Тодоровић Душан
Карличић Никола
Кубуровић Милош

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ**

**САВЕЗ МАШИНСКИХ И ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИХ
ИНЖЕЊЕРА И ТЕХНИЧАРА СРБИЈЕ, СМЕИТС**

Обрадовић Марко, Јововић Александар, Каран Миленко,
Ђурић Славко, Радић Дејан, Станојевић Мирослав,
Тодоровић Душан, Карличић Никола, Кубуровић Милош

**СУШАРЕ
ТЕОРИЈА И ЗАДАЦИ**

Прво издање

Београд, 2019.

Обрадовић Марко, доцент, Универзитет у Београду, Машински факултет
Јововић Александар, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет
Каран Миленко, асистент, Универзитет у Београду, Машински факултет
Ђурић Славко, редовни професор, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука
Радић Дејан, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет
Станојевић Мирослав, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет
Тодоровић Душан, доцент, Универзитет у Београду, Машински факултет
Карличић Никола, доцент, Универзитет у Београду, Машински факултет
Кубуровић Милош, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет

СУШАРЕ ТЕОРИЈА И ЗАДАЦИ

уџбеник

Прво издање

Рецензенти

проф. др Ивона Радовић, дипл. инж. тех.
проф. др Радивоје Топић, дипл. инж. маш.

Издавачи

Савез машинских и електротехничких инжењера и техничара Србије (СМЕИТС)
Кнеза Милоша 7аII, Београд, Србија
Машински факултет Универзитета у Београду
Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, Србија

За издавача

проф. др Радивоје Митровић, декан

Главни и одговорни уредник

проф. др Милан Лечић

Дизајн корица:

Драгојловић Немања

Штампа:

Парагон, Београд

Одобрено за штампу:

Одлуком декана Машинског факултета у Београду

26/2019 од 9.9.2019. године.

Тираж: 300

ISBN 978-86-81505-95-3

ПРЕДГОВОР

Област процесне технике је као посебно усмерење у наставни план на Машински факултет Универзитета у Београду технике уведена 1959. године. Развојем домаће процесне и прерађивачке индустрије, развијала се и настава увођењем предмета у којима су се изучавале технолошке операције са једне стране, и технолошки апарати и машине, са друге стране. Већ је наставни план од 1973. године обухватио седам предмета усмерења (Конструкција и прорачун апарата, Основе технолошких процеса, Машине и апарати за механичке и хидромеханичке операције, Простирање топлоте и масе, Технолошки и дифузиони апарати, Индустијске пећи), а настава из области сушења уводи се кроз посебан предмет Сушаре. Иако је сушење једна од многобројних процесних операција које су сврстане у основне процесне операције (механичке, хидромеханичке, топлотне, дифузионе, хемијске и биохемијске), због свог значаја и заступљености у многим технолошким процесима, издваја се као посебна целина за себе. У великом броју случајева добијање одређених производа заснива се првенствено на процесу сушења. На тај начин, наставни програм предмета Сушаре обухватио је следећа поглавља: Дефиниција процеса сушења, подела, примена и значај процеса и опреме за сушење, дефиниција основних величина, мерење масеног удела влаге; Статика процеса сушења; Кинетика процеса сушења; Кинетика конвективног сушења влажног материјала; Криве кинетике сушења; Криве брзине сушења; Пројектовање сушара; Опште поставке при пројектовању сушара, основни захтеви код сушара, избор конструкције сушаре и помоћних уређаја код сушаре, избор агенса сушења и носиоца топлоте; Билансирање процеса; Материјални и енергетски биланс сушаре; Теоријска и стварна сушара; Графичко приказивање одвијања процеса у сушари; Топлотни прорачун сушара; Топлотни прорачун сушара помоћу равнотежног дијаграма "енталпија-састав" и "енталпија-температура", сушење загрејаним ваздухом и разблаженим димним гасовима и степен корисности конвективних сушара; Типови и класификација конструкција сушара; Помоћни уређаји сушара; Техноекономски показатељи рада сушара.

И тако, скоро тридесет година касније, као резултат вишегодишњег рада аутора у настави и инжењерској пракси у овој области започиње рад на књизи "Сушаре – теорија и задаци", првенствено ангажовањем предметног наставника професора др Милоша Кубуровића, и неколико сарадника. Петнаест година касније, уз велики труд и рад бројних колега са Факултета и ван њега, настала је ова верзија књиге, а материја обрађена у књизи постала је и саставни део предмета Сушаре на мастер студијама Модула

за процесну технику и заштиту животне средине на Машинском факултету у Београду.

Првом рецензијом текста од стране професора др Димитрија Вороњеца, унапређена је сама концепција, али и начин приказа извода из теорије у поглављима књиге. Коначне верзије прегледали су др Ивона Радовић професор Технолошко-металуршког факултета у Београду и др Радивоје Топић професор Машинског факултета у Београду. Њихове сугестије су допринеле фином дотеривању књиге, на чему им се посебно захваљујемо.

Књига обухвата десет поглавља: (1) Прорачун параметара влажних материјала; (2) Термодинамичка својства влажног ваздуха; (3) Материјални и топлотни биланс процеса сушења; (4) Прорачун параметара сушења, сушење разблаженим димним гасовима; (5) Прорачун параметара сушења са међузагревањем и рецикулацијом ваздуха; (6) Прорачун сушара при шаржном процесу сушења; (7) Прорачун цевних сушара; (8) Прорачун сушења у континуалним коморама за сушење са директним загревањем; (9) Прорачун ротационих сушара и (10) Прорачун сушара са флуидизованим и фонтанским слојем, са укупно 119 рачунских примера. На почетку сваког поглавља приказан је преглед коришћених једначина са допунама које су дате у осам прилога.

Надамо се да ће ова књига бити од помоћи и стручњацима који раде на пословима пројектовања и експлоатације постројења у којима се одвија процес сушења, као и студентима техничких факултета у чијим наставним програмима је ова област заступљена.

Унапред се захваљујемо на свим примедбама и сугестијама које ћемо узети у обзир и уградити у евентуално будуће издање или проширење ове књиге.

Како се ове године навршава 60 година од почетка наставе из области процесне технике на Машинском факултету у Београду, издавање књиге представља мали допринос овом јубилеју и омаж свим прегаоцима из области процесне технике са и ван Машинског факултета у Београду.

САДРЖАЈ

Предговор	3
1. Прорачун параметара влажних материјала	7
1.1. Преглед коришћених једначина	7
1.2. Задачи.....	9
2. Термодинамичка својства влажног ваздуха	13
2.1. Преглед коришћених једначина	13
2.2. Задачи.....	16
3. Материјални и топлотни биланс процеса сушења	37
3.1. Преглед коришћених једначина	37
3.2. Задачи.....	46
4. Прорачун параметара сушења, сушење разблаженим димним гасовима.....	71
4.1. Преглед коришћених једначина	71
4.1.1. Величине које се односе на гориво	71
4.1.2. Теоријска сушара	73
4.1.3. Стварна сушара	77
4.1.4. Степен корисности конвективне сушаре загреване воденом паром	81
4.2. Задачи.....	85
5. Прорачун параметара сушења са међузагревањем и рецикулацијом ваздуха	129
5.1. Задачи.....	129
6. Прорачун сушара при шаржном процесу сушења.....	147
6.1. Преглед коришћених једначина	147
6.2. Задачи.....	149
7. Прорачун цевних сушара	163
7.1. Преглед коришћених једначина	163
7.2. Задачи.....	165
8. Прорачун сушења у континуалним коморама за сушење са директним загревањем	183
8.1. Преглед коришћених једначина	183
8.1.1. Процес сушења при високим температурама	183
8.1.2. Процес сушења при ниским температурама (супротносмерна комора за сушење)	185

8.1.3. Истосмерна комора за сушење	189
8.2. Задаци.....	191
9. Прорачун ротационих сушара.....	203
9.1. Преглед коришћених једначина.....	203
9.2. Задаци.....	206
10. Прорачун сушара са флуидизованим и фонтанским слојем.....	223
10.1. Преглед коришћених једначина.....	223
10.1.1. Минимална брзина флуидизације.....	223
10.1.2. Горња гранична брзина флуидизованог стања.....	227
10.1.3. Одређивање потребне висине слоја у коморама за сушење са унакрсним током	229
10.1.4. Одређивање димензија коморе за сушење са флуидизованим слојем.....	232
10.1.5. Одређивање висине флуидизованог слоја у коморама за сушење.....	234
10.1.6. Фонтански слој.....	236
10.2. Задаци.....	237
Прилози.....	277
Прилог I: Равнотежни дијаграм "енталпија – састав" за влажан ваздух	279
Прилог II: Зависност бројне размере од израза $\frac{x}{\sqrt{d_{me}^3}}$	281
Прилог III: Експериментални изрази за одређивање минималне брзине флуидизације	282
Прилог IV: Експериментални изрази за одређивање брзине слободног пада сферне честице	283
Прилог V: Подаци о резултатима мерења транспорта супстанције у флуидизованом слоју.....	284
Прилог VI: Поређење важнијих резултата и корелација транспорта супстанције у флуидизованом слоју	285
Прилог VII: Изрази за одређивање минималне брзине фонтановања	286
Прилог VIII: Изрази за одређивање порозности фонтанског слоја	287
Списак коришћених ознака.....	289
Литература.....	301

1. ПРОРАЧУН ПАРАМЕТАРА ВЛАЖНИХ МАТЕРИЈАЛА

1.1. Преглед коришћених једначина

Масени удео влаге у влажном материјалу је:

$$\tilde{x} = \frac{m_W}{m_S + m_W} = \frac{m_W}{m_{WM}}, \frac{\text{kg w}}{\text{kg w m}}, \quad (1.1)$$

односно:

$$\tilde{x} = \frac{m_W}{m_S + m_W} \cdot 100 = \frac{m_W}{m_{WM}} \cdot 100, \% , \quad (1.2)$$

где су:

- m_W , kgw – маса влаге у материјалу,
- m_S , kgsm – маса апсолутно сувог материјала,
- m_{WM} , kgwm – маса влажног материјала.

Влажност материјала је однос масе влаге и масе апсолутно сувог материјала:

$$\tilde{X} = \frac{m_W}{m_S}, \frac{\text{kg w}}{\text{kg s m}}, \quad (1.3)$$

односно:

$$\tilde{X} = \frac{m_W}{m_S} \cdot 100, \% . \quad (1.4)$$

Зависност влажности материјала од масеног удела влаге може се представити изразима:

$$\tilde{X} = \frac{\tilde{x}}{1 - \tilde{x}}, \frac{\text{kg w}}{\text{kg s m}}, \quad (1.5)$$

$$\tilde{X} = \frac{100 \cdot \tilde{x}}{100 - \tilde{x}}, \% , \quad (1.6)$$

а зависност масеног удела од влажности материјала:

$$\tilde{x} = \frac{\tilde{X}}{1 + \tilde{X}}, \text{ kgw}, \quad (1.7)$$

$$\tilde{x} = \frac{100 \cdot \tilde{X}}{100 + \tilde{X}}, \%. \quad (1.8)$$

При промени масеног удела воде од вредности \tilde{x}_1 до вредности \tilde{x}_2 , маса воде издвојене из материјала је:

$$\Delta m_W = m_1 \cdot \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}{1 - \tilde{x}_2}, \text{ kgw}, \quad (1.9)$$

$$\Delta m_W = m_2 \cdot \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}{1 - \tilde{x}_1}, \text{ kgw}, \quad (1.10)$$

или, ако је масени удео воде изражен у процентима:

$$\Delta m_W = m_1 \cdot \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}{100 - \tilde{x}_2}, \text{ kgw}, \quad (1.11)$$

$$\Delta m_W = m_2 \cdot \frac{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2}{100 - \tilde{x}_1}, \text{ kgw}, \quad (1.12)$$

где су:

m_1 , kgwm – маса влажног материјала са масеним уделом воде \tilde{x}_1 ,

m_2 , kgwm – маса влажног материјала са масеним уделом воде \tilde{x}_2 .

При одређивању капацитета сушара у одговарајућим изразима се уместо величине маса користи величина масени проток.

Маса издвојене воде при сушењу материјала од влажности \tilde{X}_1 до влажности \tilde{X}_2 , у зависности од масе апсолутно сувог материјала може се одредити коришћењем израза:

$$\Delta m_W = m_S \cdot (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2), \text{ kgw}, \quad (1.13)$$

или, ако је влажност изражена у процентима:

$$\Delta m_W = m_S \cdot \frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2}{100}, \text{ kgw}, \quad (1.14)$$

односно:

$$\Delta m_W = m_1 \cdot \frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2}{1 + \tilde{X}_1}, \text{ kgw}, \quad (1.15)$$

$$\Delta m_W = m_2 \cdot \frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2}{1 + \tilde{X}_2}, \text{ kgw}. \quad (1.16)$$

2. ТЕРМОДИНАМИЧКА СВОЈСТВА ВЛАЖНОГ ВАЗДУХА

2.1. Преглед коришћених једначина

Апсолутна влажност влажног ваздуха може се одредити помоћу израза:

$$x = \frac{M_W}{M_{SV}} \cdot \frac{p_W}{p - p_W}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}, \quad (2.1)$$

где су:

M_W , $\frac{\text{kgw}}{\text{kmolw}}$ – моларна маса водене паре,

M_{SV} , $\frac{\text{kgsv}}{\text{kmolsv}}$ – моларна маса сувог ваздуха,

p_W , Pa – парцијални притисак водене паре,

p , Pa – притисак влажног ваздуха.

Ако се са p_W^z означи притисак засићене водене паре при температури влажног ваздуха, онда је релативна влажност:

$$\varphi = \frac{p_W}{p_W^z}, \quad - , \quad (2.2)$$

па је израз за апсолутну влажност

$$x = \frac{M_W}{M_{SV}} \cdot \frac{\varphi \cdot p_W^z}{p - \varphi \cdot p_W^z}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}. \quad (2.3)$$

Код влажног ваздуха је $M_W = 18 \frac{\text{kgw}}{\text{kmolw}}$ и $M_{SV} = 28,95 \frac{\text{kgsv}}{\text{kmolsv}}$, па се апсолутна влажност може одредити коришћењем израза:

$$x = 0,622 \cdot \frac{p_W}{p - p_W} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_W^z}{p - \varphi \cdot p_W^z}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}. \quad (2.4)$$

Енталпија незасићеног влажног ваздуха може се одредити као збир енталпија сувог ваздуха и водене паре. Сведено на један килограм сувог ваздуха, енталпија влажног ваздуха је:

$$h = h_{SV} + x \cdot h_{vp}, \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}}. \quad (2.5)$$

Енталпија сувог ваздуха је:

$$h_{SV} = c_{psv} \cdot t, \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}}, \quad (2.6)$$

а енталпија водене паре:

$$h_W = c_{pW} \cdot t + r_0, \frac{\text{kJ}}{\text{kgw}}, \quad (2.7)$$

где су:

- $c_{psv}, \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет сувог ваздуха при константном притиску,
 $c_{pW}, \frac{\text{kJ}}{\text{kgw} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет водене паре при константном притиску,
 $t, ^\circ\text{C}$ – температура влажног ваздуха,
 $r_0, \frac{\text{kJ}}{\text{kgw}}$ – топлота испаравања воде.

За референтно стање узима се да је $t = 0 ^\circ\text{C}$. За уобичајене техничке проблеме може се са довољном тачношћу узети да је:

$$c_{psv} = 1,00 \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv} \cdot \text{K}},$$

$$c_{pW} = 1,86 \frac{\text{kJ}}{\text{kgw} \cdot \text{K}},$$

$$r_0 = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kgw}}.$$

Заменом претходних вредности у једначину (2.5), добија се да је енталпија незасићеног влажног ваздуха:

$$h = 1,00 \cdot t + x \cdot (1,86 \cdot t + 2500), \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}}. \quad (2.8)$$

Специфична запремина влажног ваздуха по килограму сувог ваздуха може се одредити на основу израза:

$$v_{vg} = \frac{R_u \cdot T}{M_{SV} \cdot (p - \varphi \cdot p_W^z)}, \frac{\text{m}^3}{\text{kgsv}}, \quad (2.9)$$

где су:

- $R_u = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$ – универзална гасна константа,
 T, K – температура влажног ваздуха.

а специфична запремина водене паре у ваздуху може се одредити помоћу израза:

$$v_w = (0,00283 + 0,00456 \cdot x) \cdot (t + 273), \frac{\text{m}^3}{\text{kgsv}}. \quad (2.10)$$

На сличан начин добија се израз за одређивање густине влажног ваздуха:

$$\rho = \frac{3,48 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (p - 0,378 \cdot \varphi \cdot p_w^z), \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (2.11)$$

или у облику:

$$\rho = \frac{1+x}{v_w}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (2.12)$$

При адијабатском мешању два тока незасићеног влажног ваздуха за одређивање стања новонастале мешавине користе се следеће билансне једначине (слика 2.1): биланс енергије

$$(\dot{m}_{sv})_A \cdot h_A + (\dot{m}_{sv})_B \cdot h_B = (\dot{m}_{sv})_M \cdot h_M, \quad (2.13)$$

биланс масе

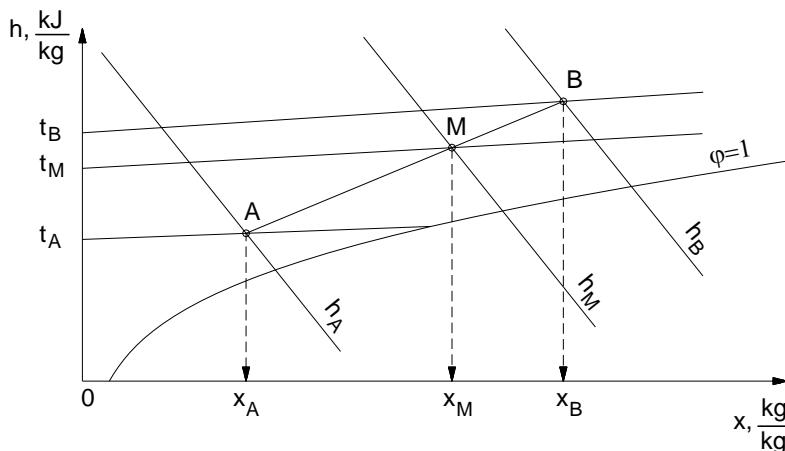
$$(\dot{m}_{sv})_A \cdot (1+x_A) + (\dot{m}_{sv})_B \cdot (1+x_B) = (\dot{m}_{sv})_M \cdot (1+x_M), \quad (2.14)$$

биланс водене паре

$$(\dot{m}_{sv})_A \cdot x_A + (\dot{m}_{sv})_B \cdot x_B = (\dot{m}_{sv})_M \cdot x_M, \quad (2.15)$$

биланс сувог ваздуха

$$(\dot{m}_{sv})_A + (\dot{m}_{sv})_B = (\dot{m}_{sv})_M. \quad (2.16)$$



Слика 2.1. Адијабатско мешање два стања влажног ваздуха ($\rho = \text{const.}$)

Помоћу билансних једначина (2.13) до (2.16) одређује се стање М на крају процеса мешања. Тако ће специфична енталпија влажног ваздуха стања М имати вредност:

$$h_M = \frac{(\dot{m}_{sv})_A \cdot h_A + (\dot{m}_{sv})_B \cdot h_B}{(\dot{m}_{sv})_M}, \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}}, \quad (2.17)$$

или у облику:

$$h_M = (1 - \eta) \cdot h_A + \eta \cdot h_B, \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}}. \quad (2.18)$$

где су:

- $(\dot{m}_{SV})_A, (\dot{m}_{SV})_B, (\dot{m}_{SV})_M, \frac{\text{kgsv}}{\text{s}}$ – масени проток сувог ваздуха стања А (тачка А), стања В (тачка В) и стања М (тачка М),
- $h_A, h_B, h_M, \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}}$ – енталпије влажног ваздуха у стању А, В и М,
- $\eta, -$ – степен рецикулације потрошње ваздуха.

Апсолутна влажност за мешавину може се одредити помоћу израза:

$$x_M = \frac{(\dot{m}_{SV})_A \cdot x_A + (\dot{m}_{SV})_B \cdot x_B}{(\dot{m}_{SV})_M}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}. \quad (2.19)$$

2.2. Задачи

Задатак 2.1. Температура влажног ваздуха је 50 °С, релативна влажност 100% притисак $1,013 \cdot 10^5$ Pa, притисак засићења водене паре $0,1233 \cdot 10^5$ Pa и апсолутна влажност $0,0875 \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$. Одредити густину влажног ваздуха и специфичну запремину.

Решење:

Незасићен влажан ваздух је двокомпонентна мешавина коју чине водена пара и компонента сув ваздух. Према задатим условима потребно је извести зависност густине влажног ваздуха од температуре, укупног притиска, релативне влажности и притиска засићења водене паре.

Густина компоненте у мешавини може се одредити коришћењем једначине стања идеалног гаса:

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_{gi} \cdot T} = \frac{p_i}{\frac{R_u}{M_i} \cdot T} = \frac{p_i \cdot M_i}{R_u \cdot T}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

где су:

- p_i, Pa – парцијални притисак компоненте,
- $R_{gi}, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – гасна константа компоненте,
- $R_u = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$ – универзална гасна константа,
- $M_i, \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ – моларна маса компоненте,
- T, K – апсолутна температура мешавине.

При нормалним условима ($T_0 = 273 \text{ K}$, $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$) једначина стања идеалног гаса је:

$$p_0 \cdot V_0 = n \cdot R_u \cdot T_0,$$

односно:

$$R_u = \frac{p_0 \cdot V_0}{n \cdot T_0} = 22,4 \cdot \frac{p_0}{T_0}, \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}},$$

при чему је запремина једног киломола идеалног гаса при нормалним условима:

$$\frac{V_0}{n} = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}},$$

где је: $n = 1 \text{ kmol}$ – број киломолова компоненте.

Заменом израза за R_u у израз за ρ_i добија се:

$$\rho_i = \frac{p_i \cdot M_i}{22,4 \cdot \frac{p_0}{T_0} \cdot T} = \frac{p_i \cdot M_i \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

па је густина водене паре:

$$\rho_w = \frac{p_w \cdot M_w \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0} = \frac{\varphi \cdot p_w^z \cdot M_w \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0}, \frac{\text{kgw}}{\text{m}^3},$$

а густина сувог ваздуха:

$$\rho_{sv} = \frac{p_{sv} \cdot M_{sv} \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0} = \frac{(p - \varphi \cdot p_w^z) \cdot M_{sv} \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0}, \frac{\text{kgsv}}{\text{m}^3},$$

при чему је парцијални притисак водене паре:

$$p_w = \varphi \cdot p_w^z, \text{ Pa},$$

а парцијални притисак сувог ваздуха:

$$p_{sv} = p - p_w = p - \varphi \cdot p_w^z, \text{ Pa},$$

где су:

$M_w, M_{sv}, \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ – моларне масе водене паре и сувог ваздуха,

$\varphi, \%$ – релативна влажност ваздуха,

$p_w^z, \text{ Pa}$ – притисак засићења водене паре,

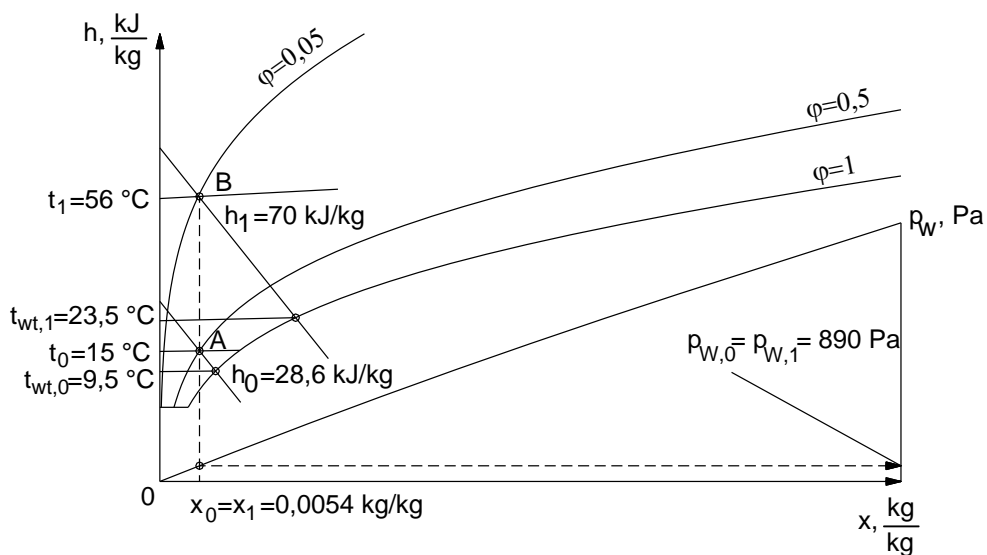
$p, \text{ Pa}$ – притисак влажног ваздуха.

Густина влажног ваздуха је:

$$\rho = \rho_w + \rho_{sv} = \frac{\varphi \cdot p_w^z \cdot M_w \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0} + \frac{(p - \varphi \cdot p_w^z) \cdot M_{sv} \cdot T_0}{22,4 \cdot T \cdot p_0}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$\rho = \frac{M_{sv} \cdot T_0 \cdot p}{22,4 \cdot T \cdot p_0} \cdot \left(\frac{M_w}{M_{sv}} \cdot \frac{\varphi \cdot p_w^z}{p} + 1 - \varphi \cdot \frac{p_w^z}{p} \right), \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$\rho = \frac{M_{sv} \cdot T_0 \cdot p}{22,4 \cdot T \cdot p_0} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{M_w}{M_{sv}} \right) \cdot \frac{\varphi \cdot p_w^z}{p} \right], \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$



Слика 2.15. Дијаграм "енталпија – састав" за влажан ваздух ($p = \text{const.}$)

3. МАТЕРИЈАЛНИ И ТОПЛОТНИ БИЛАНС ПРОЦЕСА СУШЕЊА

3.1. Преглед коришћених једначина

Средњи потенцијал (средња погонска сила) процеса сушења у теоријској сушари (у теоријској сушари се претпоставља да се сва топлота доведена ваздуху у предгрејачу користи само за испаравање влаге из материјала, тј. да је промена стања ваздуха у контакту са материјалом адијабатска, не мења се његова енталпија) може се одредити помоћу израза:

$$\Delta x_m = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{\ln \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2}}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}, \quad (3.1)$$

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}}, \text{ K},$$

где су:

$$\Delta x_1 = x_z - x_1, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$$

– разлика између апсолутне влажности засићеног и незасићеног ваздуха,

$$\Delta x_2 = x_z - x_2, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$$

$$\theta_1 = t_1 - t_{wt}, \text{ K}$$

– разлика између температуре ваздуха и температуре површине влажног материјала (узете да је једнака температури влажног термометра).

$$\theta_2 = t_2 - t_{wt}, \text{ K}$$

Брзина сушења при струјању гаса преко површине материјала може се одредити на основу израза:

$$N_{kr} = \beta_x \cdot (x_{zp} - x), \frac{\text{kgw}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}, \quad (3.2)$$

где су:

- $\beta_x, \frac{\text{kgsv}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ – коефицијент прелаза супстанције за ваздух,
 $x_{zp}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$ – апсолутна влажност гаса на линији засићења при температури слоја течности на површини материјала.

При струјању гаса кроз слој сушеног материјала користи се други израз за брзину сушења:

$$N = -\frac{m_s}{A} \cdot \frac{d\tilde{X}}{d\tau}, \frac{\text{kgw}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}, \quad (3.3)$$

где су:

- A, m^2 – површина сушења при струјању гаса преко површине материјала,
 τ, s – време.

Време сушења материјала може се одредити помоћу израза:

$$\tau = \int_0^{\tau} d\tau = -\frac{m_s}{A} \cdot \int_{\tilde{X}_1}^{\tilde{X}_2} \frac{d\tilde{X}}{N} = \frac{m_s}{A} \cdot \int_{\tilde{X}_2}^{\tilde{X}_1} \frac{d\tilde{X}}{N}, \quad (3.4)$$

где су:

- $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsm}}$ – почетна и крајња влажност материјала.

У периоду константне брзине сушења је $\tilde{X}_1 > \tilde{X}_{kr}$, $\tilde{X}_2 > \tilde{X}_{kr}$ и $N = N_{kr}$ (промена ВС на слици 3.1), па се време сушења може одредити на основу израза:

$$\tau = \frac{m_s \cdot (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2)}{A \cdot N_{kr}}. \quad (3.5)$$

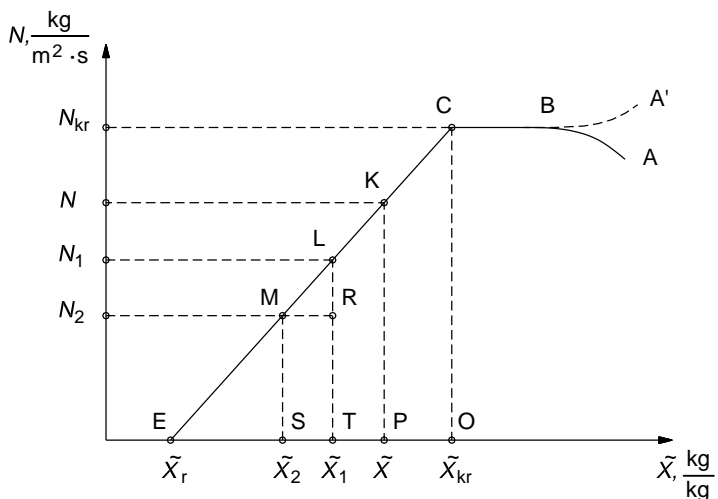
Величина \tilde{X}_{kr} се назива критична влажност материјала. У периоду опадајуће брзине сушења (промена СКЕ на слици 3.1) је $\tilde{X}_1 < \tilde{X}_{kr}$ и $\tilde{X}_2 < \tilde{X}_{kr}$, сушење се одвија при променљивој брзини сушења. У општем случају, за било који облик криве СКЕ (слика 3.1) једначина (3.4) се може графички интегралити одређивањем површине испод криве СКЕ у координатном систему " $\frac{1}{N} - \tilde{X}$ ".

У специјалном случају величина N може бити линеарно зависна од \tilde{X} (крива СК на слици 3.1) тј.:

$$N = m \cdot \tilde{X} + b, \quad (3.6)$$

где су:

- $m, \frac{\text{kgw}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot \frac{\text{kgw}}{\text{kgsm}}$ – коефицијент правца линеарног дела брзине сушења,
 $b, \frac{\text{kgw}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ – константа.



Слика 3.1. Линеарна зависност (C-E) опадајуће брзине сушења од влажности материјала (константни услови сушења)

Заменом израза (3.6) у израз (3.4) и после интегралне добија се израз за одређивање времена сушења при линеарној зависности N од \tilde{X} :

$$\tau = \frac{m_s}{m \cdot A} \cdot \ln \frac{m \cdot \tilde{X}_1 + b}{m \cdot \tilde{X}_2 + b} \quad (3.7)$$

Пошто је $N_1 = m \cdot \tilde{X}_1 + b$ и $N_2 = m \cdot \tilde{X}_2 + b$, а коефицијент правца:

$$m = \frac{N_1 - N_2}{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2}, \quad (3.8)$$

то се израз (3.7) може написати у облику:

$$\tau = \frac{m_s \cdot (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2)}{A \cdot (N_1 - N_2)} \cdot \ln \frac{N_1}{N_2} = \frac{m_s \cdot (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2)}{A \cdot N_m}, \quad (3.9)$$

при чему је средња логаритамска разлика:

$$N_m = \frac{N_1 - N_2}{\ln \frac{N_1}{N_2}}. \quad (3.10)$$

Често се крива опадајуће брзине у целој области може узети као права линија између тачака C и E (слика 3.1).

Нека тачка K представља текуће стање са координатама (\tilde{X}, N) . Коефицијент правца је:

$$m = \frac{N}{\tilde{X} - \tilde{X}_r}, \quad (3.11)$$

а брзина:

$$N = m \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r). \quad (3.12)$$

На основу сличности $\triangle CEO$ и $\triangle KEP$ следи:

$$\frac{N}{N_{kr}} = \frac{\tilde{X} - \tilde{X}_r}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}, \quad (3.13)$$

односно:

$$N = \frac{N_{kr} \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}. \quad (3.14)$$

На основу израза (3.12) брзина сушења при линеарној промени опадајуће брзине је:

$$N = m \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r) = \frac{N_{kr} \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}. \quad (3.15)$$

Нека су тачке L и M са координатама (\tilde{X}_1, N_1) и (\tilde{X}_2, N_2) . На основу сличности троуглова $\triangle CEO$ и $\triangle LMR$ је:

$$\frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2}{N_1 - N_2} = \frac{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}{N_{kr}}, \quad (3.16)$$

а на основу сличности троуглова $\triangle LET$ и $\triangle LMR$ добија се:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_r}{\tilde{X}_2 - \tilde{X}_r}. \quad (3.17)$$

Коришћењем израза (3.9):

$$\tau = \frac{m_s \cdot (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2)}{A \cdot (N_1 - N_2)} \cdot \ln \frac{N_1}{N_2},$$

и израза (3.16) и (3.17) добија се израз за одређивање времена сушења при линеарној промени опадајуће брзине сушења:

$$\tau = \frac{m_s \cdot (\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r)}{N_{kr} \cdot A} \cdot \ln \frac{\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2}{\tilde{X}_2 - \tilde{X}_r}. \quad (3.18)$$

При струјању агенса сушења преко површине материјала, брзина испаравања влаге и температура површине могу се одредити из топлотног биланса. Укупно специфично топлотно оптерећење (слика 3.2) је:

$$q = q_h + q_\epsilon + q_\lambda, \quad \frac{W}{m^2}, \quad (3.19)$$

при чему је специфично топлотно оптерећење услед количине топлоте доведене површини:

$$q_h, \quad \frac{W}{m^2} \quad - \quad \text{прелажењем,}$$

$$q_\epsilon, \quad \frac{W}{m^2} \quad - \quad \text{зрачењем,}$$

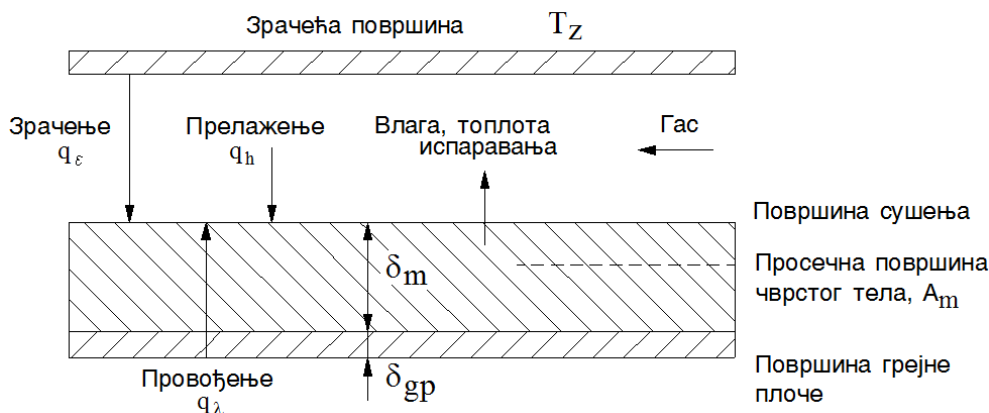
$q_\lambda, \frac{W}{m^2}$ – провођењем.

Ако се занемари топлота потребна за прегревање испарене влаге до температуре гаса T_g , онда се доведена количина топлоте троши само на топлоту испаравања влаге из материјала:

$$q = N_{kr} \cdot r_{mz}, \quad (3.20)$$

где је:

$r_{mz}, \frac{J}{kg}$ – топлота испаравања влаге при T_{mz} .



Слика 3.2. Сушење чврстог тела у струји гаса при константној брзини сушења

Ознаке везане за слику 3.2. су:

- δ_m, m – дебљина сушеног материјала,
- δ_{gp}, m – дебљина грејне плоче,
- A, m^2 – површина сушења,
- A_m, m^2 – просечна површина чврстог материјала,
- A_{gp}, m^2 – површина грејне плоче,
- T_z, K – апсолутна температура зрачеће површине,
- T_g, K – апсолутна температура гаса,
- T_{mz}, K – апсолутна температура површине сушења (стање влажног гаса је на линији засићења).

Остале величине везане за слику 3.2 су:

- $\rho, \frac{kg}{m^3}$ – густина влажног гаса
- $w_g, \frac{m}{s}$ – брзина гаса

$x, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$ – апсолутна влажност гаса

Специфично топлотно оптерећење q_h може се одредити коришћењем израза:

$$q_h = h_h \cdot (T_g - T_{mz}), \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (3.21)$$

а специфично топлотно оптерећење q_ε :

$$q_\varepsilon = \varepsilon \cdot C_c \cdot 10^{-8} \cdot (T_z^4 - T_{mz}^4) = h_\varepsilon \cdot (T_z - T_{mz}), \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (3.22)$$

при чему је коефицијент прелажења топлоте при зрачењу:

$$h_z = \frac{\varepsilon \cdot C_c \cdot 10^{-8} \cdot (T_z^4 - T_{mz}^4)}{T_z - T_{mz}}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}, \quad (3.23)$$

где су:

ε – редуковани коефицијент емисије при зрачењу површине тела температуре T_z на површину тела температуре T_{mz} ,

$C_c = 5,67 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$ – константа зрачења апсолутно црног тела,

$h_h, \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ – коефицијент прелажења топлоте.

Специфично топлотно оптерећење услед количине топлоте доведене провођењем кроз слој сушеног материјала може се одредити на основу израза:

$$q_\lambda = k_\lambda \cdot (T_g - T_{mz}), \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (3.24)$$

при чему је коефицијент пролажења топлоте:

$$k_\lambda = \frac{1}{\frac{1}{h_h} \cdot \frac{A}{A_{gp}} + \frac{\delta_{gp}}{\lambda_{gp}} \cdot \frac{A}{A_{gp}} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} \cdot \frac{A}{A_m}}, \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}. \quad (3.25)$$

На основу израза (3.2), (3.19) до (3.24) може се извести израз за константну брзину сушења:

$$N_{kr} = \beta_x \cdot (x_{zp} - x) = \frac{q}{r_{mz}} = \frac{q_h + q_\varepsilon + q_\lambda}{r_{mz}}, \quad (3.26)$$

$$N_{kr} = \frac{h_h \cdot (T_g - T_{mz}) + h_\varepsilon \cdot (T_z - T_{mz}) + k_\lambda \cdot (T_g - T_{mz})}{r_{mz}}, \quad (3.27)$$

односно:

$$N_{kr} = \frac{q}{r_{mz}} = \beta_x \cdot (x_{zp} - x) = \frac{(h_h + k_\lambda) \cdot (T_g - T_{mz}) + h_\varepsilon \cdot (T_z - T_{mz})}{r_{mz}}. \quad (3.28)$$

Трансформацијом израза:

$$\beta_x \cdot (x_{zp} - x) = \frac{(h_h + k_\lambda) \cdot (T_g - T_{mz}) + h_\varepsilon \cdot (T_z - T_{mz})}{r_{mz}},$$

$$\frac{\beta_x \cdot (x_{zp} - x) \cdot r_{mz}}{h_h} = \left(1 + \frac{k_\lambda}{h_h}\right) \cdot (T_g - T_{mz}) + \frac{h_\varepsilon}{h_h} \cdot (T_z - T_{mz}),$$

добија се зависност:

$$\frac{(x_{zp} - x) \cdot r_{mz}}{\frac{h_h}{\beta_x}} = \left(1 + \frac{k_\lambda}{h_h}\right) \cdot (T_g - T_{mz}) + \frac{h_\varepsilon}{h_h} \cdot (T_z - T_{mz}). \quad (3.29)$$

При струјању гаса паралелно са површином сушења и између паралелних плоча (на пример између полица у коморној сушари), у области од $Re = 2600 - 22000$ може се применити зависност:

$$\frac{h_h}{c_{pvg} \cdot \rho \cdot w_g} \cdot Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{\beta_x}{\rho \cdot w_g} Sc^{\frac{2}{3}} = 0,11 \cdot Re^{-0,29}. \quad (3.30)$$

Бездимензиони Прантлов (Prandtl) број дефинисан је изразом:

$$Pr = \frac{c_{pvg} \cdot \mu}{\lambda}, \quad (3.31)$$

а Шмитов (Schmidt) бездимензиони број:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D}, \quad (3.32)$$

где су:

μ , Pa·s – динамичка вискозности гаса,

λ , $\frac{W}{m \cdot K}$ – термичка проводност гаса,

D , $\frac{m^2}{s}$ – дифузивност (коэффициент дифузије) влаге.

Рејнолдсов (Reynolds) број у изразу (3.30) дефинисан је изразом:

$$Re = \frac{d_e \cdot \rho \cdot w_g}{\nu}, \quad (3.33)$$

где су:

d_e , m – еквивалентни пречник пресека нормалног на брзину гаса који струји преко површине сушења (слика 3.2),

ν , $\frac{m^2}{s^2}$ – кинематска вискозност гаса.

При температури влажног ваздуха $95^\circ C$ вредност коэффициента прелажења топлоте може се одредити коришћењем израза:

$$h_h = 5,90 \cdot \frac{(\rho \cdot w_g)^{0,71}}{d_e^{0,29}}. \quad (3.34)$$

При струјању ваздуха брзином нормалном на површину сушења, при вредности $\rho \cdot w_g = 1,08 - 5,04 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, вредност коефицијента прелажења топлоте може се одредити на основу израза:

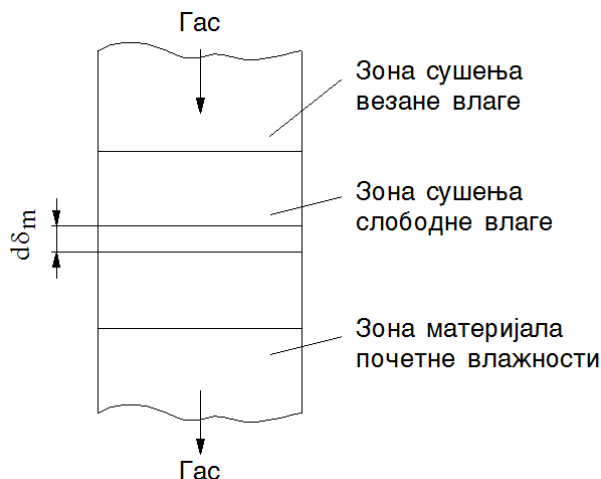
$$h_h = 24,2 \cdot (\rho \cdot w_g)^{0,37}. \quad (3.35)$$

Када гас пролази кроз слој зрнастог материјала, криве брзине сушења могу да буду доста сличне промени приказаној на слици 3.1. Разматра се сушење слоја насутог материјала (слика 3.3) чија је висина знатно већа од пречника зрна сушеног материјала. Максимална брзина сушења је када гас у стању засићења напушта слој и одређује се помоћу израза:

$$N_{\max} = \rho \cdot w_g \cdot (x_{zp} - x_1), \quad (3.36)$$

где су:

$x_1, x_{zp}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$ – почетна и крајња апсолутна влажност гаса (ваздуха).



Слика 3.3. Приказ струјања агенса сушења кроз слој насутог материјала

У општем случају када незасићен гас, апсолутне влажности x_2 напушта слој брзина сушења се може представити изразом:

$$N = \rho \cdot w_g \cdot (x_2 - x_1). \quad (3.37)$$

Брзина сушења у диференцијалном облику може се приказати изразом:

$$dN = \rho \cdot w_g \cdot dx = \beta_x \cdot dS \cdot (x_{zp} - x), \quad (3.38)$$

при чему је површина свих честица, сведена на јединичну површину попречног пресека сушаре (слика 3.3)

$$dS = a \cdot d\delta_m, \quad \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}, \quad (3.39)$$

где су:

- $dx, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$ – диференцијална промена апсолутне влажности гаса (влажног ваздуха),
- $a, \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$ – површина честица садржаних у јединичној запремини слоја,
- $d\delta_m, \text{m}$ – диференцијална дебљина слоја,
- $x_2, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$ – апсолутна влажност гаса (ваздуха) на крају сушења.

После трансформације израза (3.39) и интегралгења:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x_{zp} - x} = \int_0^{\delta_m} \frac{\beta_x \cdot a \cdot d\delta_m}{\rho \cdot w_g}, \quad (3.40)$$

добила се израз за одређивање броја јединица преноса:

$$\ln \frac{x_{zp} - x_1}{x_{zp} - x_2} = N_{tug} = \frac{\beta_x \cdot a \cdot \delta_m}{\rho \cdot w_g}. \quad (3.41)$$

На основу израза (3.36) и израза (3.37) може се извести однос брзина сушења:

$$\frac{N}{N_{\max}} = \frac{\rho \cdot w_g \cdot (x_2 - x_1)}{\rho \cdot w_g \cdot (x_{zp} - x_1)} = \frac{x_2 - x_1}{x_{zp} - x_1}, \quad (3.42)$$

односно:

$$\frac{N}{N_{\max}} = \frac{(x_{zp} - x_1) - (x_{zp} - x_2)}{x_{zp} - x_1} = 1 - \frac{x_{zp} - x_2}{x_{zp} - x_1}. \quad (3.43)$$

Израз (3.41) може се написати у облику:

$$\ln \frac{x_{zp} - x_2}{x_{zp} - x_1} = -N_{tug} = -\frac{\beta_x \cdot a \cdot \delta_m}{\rho \cdot w_g}, \quad (3.44)$$

па је однос:

$$\frac{x_{zp} - x_2}{x_{zp} - x_1} = e^{-N_{tug}} = e^{-\frac{\beta_x \cdot a \cdot \delta_m}{\rho \cdot w_g}}. \quad (3.45)$$

Заменом израза (3.45) у израз (3.43) и на основу израза (3.42) добија се:

$$\frac{N}{N_{\max}} = \frac{x_2 - x_1}{x_{zp} - x_1} = 1 - \frac{x_{zp} - x_2}{x_{zp} - x_1} = 1 - e^{-N_{tug}} = 1 - e^{-\frac{\beta_x \cdot a \cdot \delta_m}{\rho \cdot w_g}}. \quad (3.46)$$

Израз (3.46) се користи за одређивање брзине N када су познате вредности величина $\beta_x \cdot a$ или N_{tug} .

При вредностима пречника зрна од 0,075 mm до 2 mm и висине слоја изнад 12 mm, за брзину издвајања влаге са непорозних зрна може се користити израз:

$$N_{tug} = \frac{0,273}{d_m^{0,35}} \cdot \left(\frac{d_m \cdot \rho \cdot w_g}{\mu} \right)^{0,215} \cdot (\tilde{X} \cdot \rho_{ms} \cdot \delta_m)^{0,64}, \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}, \quad (3.47)$$

в) Вредност константне брзине сушења по јединици времена у јединици површине осушеног материјала може се одредити коришћењем израза:

$$N_{kr} = \frac{1}{a} \cdot N = \frac{1}{0,0286} \cdot 0,875 \cdot 10^{-5} = 0,306 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kgw}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}},$$

где је:

$a = 0,0286 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$ – специфична површина осушеног материјала.

4. ПРОРАЧУН ПАРАМЕТАРА СУШЕЊА, СУШЕЊЕ РАЗБЛАЖЕНИМ ДИМНИМ ГАСОВИМА

4.1. Преглед коришћених једначина

4.1.1. Величине које се односе на гориво

Горња топлотна моћ чврстог и течног горива може се одредити коришћењем израза:

$$H_g = 340 \cdot C + 1425 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 105 \cdot S, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad (4.1)$$

где су:

C, H, O, S, % – масени удели угљеника, водоника, кисеоника и сумпора у гориву,

а доња топлотна моћ помоћу израза:

$$H_d = H_g - 25 \cdot (W + 9 \cdot H) = H_g - 2500 \cdot \frac{W + 9 \cdot H}{100}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad (4.2)$$

где су:

W, % – масени удео воде у гориву,

$r = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – топлота промене фазе при испаравању воде.

Маса водене паре по килограму горива настала испаравањем воде и сагоревањем водоника из горива може се одредити коришћењем израза:

$$\tilde{X}_w = \frac{W + 9 \cdot H}{100}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \quad (4.3)$$

Минимална маса ваздуха потребна за сагоревање једног килограма горива може се одредити коришћењем израза:

$$L_0 = \frac{1}{21} \cdot \left[1,87 \cdot C + 5,6 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0,7 \cdot S \right] \cdot \frac{M_B}{V_0}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (4.4)$$

где су:

$M_B = 28,95 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ – моларна маса сувог ваздуха,

$V_0 = 22,4 \frac{\text{m}^3}{\text{kmol}}$ – запремина једног мола ваздуха при 0°C и $1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$,

а маса сувих димних гасова по килограму горива помоћу израза:

$$\tilde{X}_{sdg} = 1 + \lambda \cdot L_0 - \frac{A + 9 \cdot H + W}{100}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (4.5)$$

где је:

λ , – – коефицијент вишка ваздуха при сагоревању.

Маса водене паре по килограму горива у димним гасовима може се одредити помоћу израза

$$\tilde{X}_{vp} = \frac{9 \cdot H + W}{100} + \lambda \cdot L_0 \cdot x_0 + m_{vpr}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (4.6)$$

где је:

x_0 , $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – апсолутна влажност ваздуха за сагоревање горива и разблажавање димних гасова,

m_{vpr} , $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – маса водене паре за распршивање горива по килограму горива.

Топлотни биланс процеса сагоревања горива може се представити изразом:

$$H_g \cdot \eta_L + c_{pG} \cdot t_G + \lambda \cdot L_0 \cdot h_0 + m_{vpr} \cdot h'_{vpr} = \tilde{X}_{sdg} \cdot c_{psg} \cdot t_g + \tilde{X}_{vp} \cdot h_{vp}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad (4.7)$$

или у облику:

$$H_g \cdot \eta_L + c_{pG} \cdot t_G + \lambda \cdot L_0 \cdot h_0 + m_{vpr} \cdot h'_{vpr} = \left(1 + \lambda \cdot L_0 - \frac{A + 9 \cdot H + W}{100} \right) \cdot c_{psg} \cdot t_g + \left(\frac{9 \cdot H + W}{100} + \lambda \cdot L_0 \cdot x_0 + m_{vpr} \right) \cdot h_{vp}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad (4.8)$$

где су:

η_L , – – степен корисности ложишта,

c_{pG} , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – средњи специфични топлотни капацитет горива,

t_G , $^\circ\text{C}$ – температура горива на улазу у ложиште,

h_0 , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија ваздуха за сагоревање и ваздуха за разблажавање димних гасова,

h'_{vpr} , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија водене паре за распршивање горива,

c_{psg} , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – средњи специфични топлотни капацитет сувих димних гасова,

t_g , $^\circ\text{C}$ – температура гасова на улазу у сушару,

- h_{vp} , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија водене паре на улазу у сушару,
 A , % – масени удео пепела у гориву.

На основу израза (4.7) односно (4.8) коефицијент вишка ваздуха на улазу у сушару је:

$$\lambda = \frac{H_g \cdot \eta_L + c_{pG} \cdot t_G - \left(1 - \frac{A + 9 \cdot H + W}{100}\right) \cdot c_{psg} \cdot t_g - \frac{9 \cdot H + W}{100} \cdot h_{vp}}{L_0 \cdot (c_{psg} \cdot t_g + x_0 \cdot h_{vp} - h_0)} + \frac{m_{vpr} \cdot (h'_{vpr} - h_{vp})}{L_0 \cdot (c_{psg} \cdot t_g + x_0 \cdot h_{vp} - h_0)}, \quad (4.9)$$

Температура сагоревања може се одредити коришћењем израза:

$$t = \frac{H_d}{V_{\text{CO}_2} \cdot c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} \cdot c_{p\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} \cdot c_{p\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot c_{p\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}}}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (4.10)$$

где су:

- V_{CO_2} , V_{SO_2} , V_{O_2} , V_{N_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$, $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ – запремина угљен-диоксида, сумпор-диоксида, кисеоника, азота и водене паре по килограму горива,
 $c_{p\text{CO}_2}$, $c_{p\text{SO}_2}$, $c_{p\text{O}_2}$, $c_{p\text{N}_2}$, $c_{p\text{H}_2\text{O}}$, $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$ – средњи специфични топлотни капацитет угљен-диоксида, сумпор-диоксида, кисеоника, азота и водене паре при константном притиску.

Заменом израза (4.2) у израз (4.10) добија се израз за одређивање температуре сагоревања у зависности од горње топлотне моћи горива:

$$t = \frac{H_g - 25 \cdot (W + 9 \cdot H)}{V_{\text{CO}_2} \cdot c_{p\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} \cdot c_{p\text{SO}_2} + V_{\text{O}_2} \cdot c_{p\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} \cdot c_{p\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{p\text{H}_2\text{O}}}, \quad ^\circ\text{C}. \quad (4.11)$$

4.1.2. Теоријска сушара

Масени проток сувог гаса у конвективној сушари може се одредити коришћењем израза:

$$\dot{m}_B = \Delta \dot{m}_W \cdot g, \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \quad (4.12)$$

а специфична потрошња сувог гаса, по јединици масе издвојене влаге:

$$g = \frac{\dot{m}_B}{\Delta \dot{m}_W} = \frac{1}{x_2 - x_0}, \quad \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (4.13)$$

где су:

- $\Delta \dot{m}_W$, $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток испарене влаге,
 x_2 , $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – крајња апсолутна влажност гаса,

$x_0, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – почетна апсолутна влажност гаса.

Из израза (4.13) следи:

$$\Delta \dot{m}_W = \dot{m}_B \cdot (x_2 - x_0), \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \quad (4.14)$$

односно:

$$\dot{m}_B = \frac{\Delta \dot{m}_W}{x_2 - x_0}, \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (4.15)$$

Почетни масени проток влажног гаса је:

$$\dot{m}_{vg0} = \dot{m}_B \cdot (1 + x_0), \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \quad (4.16)$$

а крајњи масени проток:

$$\dot{m}_{vg2} = \dot{m}_B \cdot (1 + x_2), \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (4.17)$$

Предати термички флуks у спољњем предајнику износи:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_B \cdot (h_1 - h_0), \text{W}, \quad (4.18)$$

а специфична количина топлоте предата у спољњем предајнику топлоте, по килограму испарене влаге:

$$q_s = \frac{\dot{m}_B}{\Delta \dot{m}_W} \cdot (h_1 - h_0) = g \cdot (h_1 - h_0), \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.19)$$

где су:

$h_0, h_1, \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ – почетна и крајња специфична енталпија гаса у спољњем предајнику топлоте по килограму сувог гаса.

Једначина топлотног биланса теоријске сушаре (слика 4.1) може се написати у облику:

$$\dot{m}_{B0} \cdot h_0 + \dot{Q}_s = \dot{m}_{B1} \cdot h_1 = \dot{m}_{B2} \cdot h_2, \text{W}, \quad (4.20)$$

па је при $\dot{m}_{B0} = \dot{m}_{B1} = \dot{m}_{B2}$, $h_1 = h_2 = \text{const.}$, односно процес у теоријској сушари се одвија при константној енталпији влажног ваздуха, при чему су:

$\dot{m}_{B0}, \dot{m}_{B1}, \dot{m}_{B2}, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток сувог ваздуха у стању А, В и С (слика 4.1),

$h_2, \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ – крајња енталпија ваздуха у комори за сушење.

Специфична количина топлоте потребна за испаравање влаге у теоријској сушари, по килограму испарене влаге је:

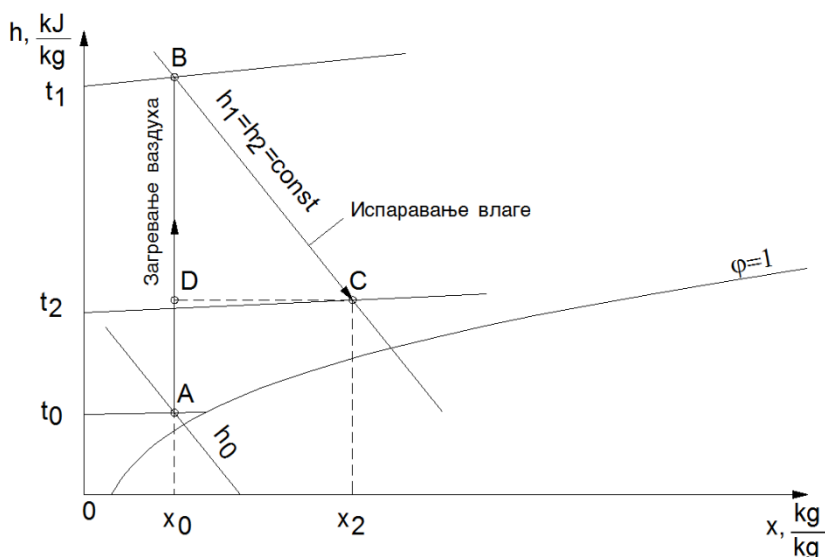
$$q_{ts} = g \cdot (h_1 - h_0) = g \cdot (h_2 - h_0), \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.21)$$

односно:

$$q_{ts} = \frac{h_1 - h_0}{x_2 - x_0} = \frac{h_2 - h_0}{x_2 - x_0}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.22)$$

или:

$$\dot{Q}_{ts} = \dot{m}_B \cdot (h_2 - h_0), \text{ W.}$$



Слика 4.1. Приказ процеса у теоријској сушари у равнотежном дијаграму "енталпија – састав"

Специфична количина топлоте потребна за испаравање влаге у теоријској сушари, по килограму испарене влаге може се одредити и помоћу израза:

$$q_{ts} = g \cdot c_{pB} \cdot (t_2 - t_0) + (1 + g \cdot x_0) \cdot h_{w2} - g \cdot x_0 \cdot h_{w0}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.23)$$

односно:

$$q_{ts} = g \cdot [c_{pB} \cdot (t_2 - t_0) + x_0 \cdot (h_{w2} - h_{w0})] + h_{w2}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.24)$$

где су:

$c_{pB}, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет сувог ваздуха,

$t_0, t_2, ^\circ\text{C}$ – почетна и крајња температура ваздуха,

$h_{w0}, h_{w2}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ – почетна и крајња специфична енталпија влаге.

Израз (4.24) указује да се потрошња топлоте у теоријској сушари састоји из губитака топлоте са излазним влажним ваздухом (суви ваздух и транзитна влага) и губитка топлоте на испаравање влаге из материјала.

Графички приказ процеса у теоријској сушари приказан је на слици 4.1. Специфична потрошња сувог ваздуха може се одредити графичким путем коришћењем израза (4.13):

$$g = \frac{1}{x_2 - x_0} = \frac{1}{\overline{CD} \cdot u_x}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (4.25)$$

а специфична количина топлоте потребна за испаравање влаге, на основу израза (4.22):

$$q_{ts} = \frac{h_2 - h_0}{x_2 - x_0} = \frac{\overline{AB} \cdot u_h}{\overline{CD} \cdot u_x} = \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}} \cdot u, \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.26)$$

при чему је однос размере за енталпију и размере за апсолутну влажност:

$$u = \frac{u_h}{u_x}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (4.27)$$

где су:

\overline{CD} , \overline{AB} , cm – дужина одговарајућих дужи (слика 4.1),

u_h , $\frac{\text{J}}{\text{kg сувог гаса}}$ – размера за енталпију,

u_x , $\frac{\text{kg влаге}}{\text{kg сувог гаса}}$ – размера за апсолутну влажност.

Специфична количина топлоте може се одредити на основу зависности (4.13) и (4.22) помоћу израза:

$$q_{ts} = \frac{h_1 - h_0}{x_2 - x_0} = \frac{h_2 - h_0}{x_2 - x_0} = g \cdot (h_2 - h_0) = g \cdot \overline{AB} \cdot u_h, \frac{\text{J}}{\text{kg}}. \quad (4.28)$$

Потрошња горива може се одредити коришћењем израза:

$$B_g = \frac{q' \cdot \Delta \dot{m}_W}{H_d \cdot \eta_L}, \frac{\text{kg}}{\text{h}}, \quad (4.29)$$

где је:

q' , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – количина топлоте потребна за испаравање влаге из килограма горива,

или у облику:

$$B_g = \frac{g}{\tilde{X}_{sdg}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot \frac{\Delta \dot{m}_W}{\tilde{X}_{sdg}} = \frac{1}{\overline{DC} \cdot u_x} \cdot \frac{\Delta \dot{m}_W}{\tilde{X}_{sdg}}, \frac{\text{kg}}{\text{h}}. \quad (4.30)$$

Потрошња горива може се одредити и помоћу израза:

$$B_g = \frac{\tilde{X}_{rdg} \cdot \Delta \dot{m}_W}{\tilde{X}_{sdg}}, \frac{\text{kg}}{\text{h}}, \quad (4.31)$$

где је:

\tilde{X}_{rdg} , $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – маса (потрошња) разблажених гасова по килограму влаге испарене у сушари.

4.1.3. Стварна сушара

У стварној сушари једначина процеса може се приказати изразом:

$$h_2 = h_1 + \frac{\Delta}{g}, \frac{J}{kg}, \quad (4.32)$$

где је:

$\Delta, \frac{J}{kg}$ – губитак или добитак топлоте по јединици масе испарене влаге.

Једначина топлотног биланса стварне континуалне сушаре може се приказати изразом (слика 4.2):

$$\begin{aligned} \dot{Q}_s + \dot{m}_{B0} \cdot h_0 + c_W \cdot \Delta \dot{m}_W \cdot t_{m1} + \dot{m}_2 \cdot c_{m1} \cdot t_{m1} + \dot{m}_{tr} \cdot c_{tr1} \cdot t_{tr1} + \dot{Q}_u = \dot{m}_{B2} \cdot h_2 + \\ + \dot{m}_2 \cdot c_{m2} \cdot t_{m2} + \dot{m}_{tr} \cdot c_{tr2} \cdot t_{tr2} + \dot{Q}_{ok}, W, \end{aligned} \quad (4.33)$$

где су:

- \dot{Q}_s, W – термички флуks предат у спољњем предајнику топлоте,
- $\dot{m}_{B0}, \dot{m}_{B2}, \frac{kg}{s}$ – почетни и крајњи масени проток сувог ваздуха у комори за сушење,
- $c_W, \frac{J}{kg \cdot K}$ – специфични топлотни капацитет влаге у течном стању,
- $\Delta \dot{m}_W, \frac{kg}{s}$ – масени проток испарене влаге,
- $t_{m1}, t_{m2}, ^\circ C$ – почетна и крајња температура материјала у комори за сушење,
- $\dot{m}_2, \frac{kg}{s}$ – крајњи масени проток материјала у комори за сушење,
- $c_{m1}, c_{m2}, \frac{J}{kg \cdot K}$ – почетни и крајњи специфични топлотни капацитет сушеног материјала у комори за сушење,
- $\dot{m}_{tr}, \frac{kg}{s}$ – масени проток транспортних уређаја,
- $c_{tr1}, c_{tr2}, \frac{J}{kg \cdot K}$ – почетни и крајњи специфични топлотни капацитет транспортних уређаја,
- $t_{tr1}, t_{tr2}, ^\circ C$ – почетна и крајња температура транспортних уређаја у комори за сушење,
- \dot{Q}_u, W – термички флуks предат у унутрашњем предајнику топлоте,
- \dot{Q}_{ok}, W – термички флуks предат околној средини.

При условима $\dot{m}_{B0} = \dot{m}_{B2}$ и $c_{m1} = c_{m2}$ и $c_{tr1} = c_{tr2}$ израз (4.33) може се написати у облику:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_s = \dot{m}_{B0} \cdot (h_2 - h_0) + \dot{m}_2 \cdot c_m \cdot (t_{m2} - t_{m1}) + \dot{m}_{tr} \cdot c_{tr} \cdot (t_{tr2} - t_{tr1}) + \dot{Q}_{ok} - \\ - \dot{Q}_u - c_W \cdot \Delta \dot{m}_W \cdot t_{m1}, W, \end{aligned} \quad (4.34)$$

$\dot{m}_2 = 0,08 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток осушеног материјала,

$c_m = 1,255 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет материјала (осушеног, усвојена вредност),

$t_{m2} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура осушеног материјала на излазу.

Укупно потребна топлота износи:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_m = 659,1 + 4,02 = 663,12 \text{ kW} = 2387255 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}.$$

5. ПРОРАЧУН ПАРАМЕТАРА СУШЕЊА СА МЕЂУЗАГРЕВАЊЕМ И РЕЦИРКУЛАЦИЈОМ ВАЗДУХА

5.1. Задаци

Задатак 5.1. Одредити проток атмосферског ваздуха и часовну потрошњу топлоте, као и температуру мешавине паре и ваздуха која излази из загрејача ваздуха, за сушару са рециркулацијом дела утрошеног ваздуха при следећим условима:
Карактеристике ваздуха:

$$\text{атмосферски: } h_0 = 50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \varphi_0 = 0,7,$$

$$\text{утрошени: } h_2 = 260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \varphi_2 = 0,8,$$

Удео рециркулисаног ваздуха је 80% укупног протока ваздуха који напушта сушару,

Масени удео влаге у материјалу:

$$\text{почетни: } \tilde{x}_1 = 47\%,$$

$$\text{крајњи: } \tilde{x}_2 = 5\%,$$

$$\text{Капацитет сушаре (проток материјала): } \dot{m}_1 = 1,5 \frac{\text{t}}{\text{h}}.$$

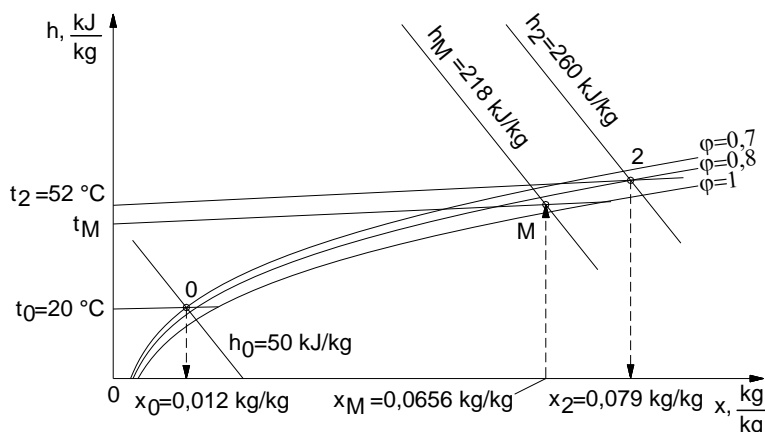
Решење:

Шема одвијања процеса сушења приказана је слици 5.1. Стање 0 добијено је у пресеку линија $h_0 = 50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ и $\varphi_0 = 0,7$ (дијаграм "енталпија – састав" прилог I) па

апсолутна влажност ваздуха за то стање износи $x_0 = 0,012 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$, а температура

$t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Стање 2 добијено је у пресеку линија $\varphi_2 = 0,8$ и $h_2 = 260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, па

апсолутна влажност ваздуха за то стање износи $x_2 = 0,079 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$, а температура $t_2 = 52 \text{ }^\circ\text{C}$.



Слика 5.1. Дијаграм "енталпија – састав" за влажан ваздух

На основу израза (2.15) апсолутна влажност мешавине на улазу у загрејач је:

$$x_M = 0,2 \cdot x_0 + 0,8 \cdot x_2 = 0,2 \cdot 0,012 + 0,8 \cdot 0,079 = 0,0656 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

а на основу израза (2.17) вредност енталпије је:

$$h_M = 0,2 \cdot h_0 + 0,8 \cdot h_2 = 0,2 \cdot 50 + 0,8 \cdot 260 = 218 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}.$$

У стању М, остале карактеристике мешавине износе (слика 5.1):

$$\varphi_M = 0,85 \text{ и } t_M = 47 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Специфични проток сувог ваздуха на основу израза (4.13) износи:

$$g = \frac{1}{x_2 - x_M} = \frac{1}{0,079 - 0,0656} = 74,63 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

док је проток испарене воде (израз (1.11)):

$$\Delta \dot{m}_W = \dot{m}_1 \cdot \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{100 - \bar{x}_2} = \frac{1,5 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{47 - 5}{100 - 5} = 0,1842 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 663,1 \frac{\text{kg}}{\text{h}},$$

па је на основу израза (4.12) проток мешавине:

$$\dot{m}_M = \Delta \dot{m}_W \cdot g = \frac{663,1}{3600} \cdot 74,63 = 13,7464 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 49487 \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

Проток атмосферског ваздуха (20%) износи:

$$\dot{m}_B = 0,2 \cdot \dot{m}_M = 0,2 \cdot \frac{49487}{3600} = 2,7493 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 9897 \frac{\text{kg}}{\text{h}}.$$

Специфична потрошња топлоте износи (израз (4.22)):

$$W = 30\%, B_{g2} = \frac{q}{(H_d)_2 \cdot \eta_k} = \frac{3038}{11055 \cdot 0,75} = 0,366 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

$$W = 60\%, B_{g3} = \frac{q}{(H_d)_3 \cdot \eta_k} = \frac{3038}{5188 \cdot 0,75} = 0,781 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

где је:

$\eta = 75\% = 0,75$ – степен корисности котла за производњу паре (позиција 5, слика 5.6).

Потрошња горива при сушењу разблаженим димним гасовима је, зависно од масеног удела влаге у гориву (Задатак 5.5):

$$W = 10\%, B'_g = 0,234 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} < B_{g,1} = 0,271 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

$$W = 30\%, B''_g = 0,329 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} < B_{g,2} = 0,366 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

$$W = 60\%, B'''_g = 0,756 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} < B_{g,3} = 0,781 \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

што показује да је потрошња горива, по килограму испарене влаге из сушеног материјала у сушари са загрејаним ваздухом (слика 5.6.б), при истим параметрима већа, него у сушари са разблаженим димним гасовима (слика 5.6.а).

6. ПРОРАЧУН СУШАРА ПРИ ШАРЖНОМ ПРОЦЕСУ СУШЕЊА

6.1. Преглед коришћених једначина

Еквивалентна брзина сушења тела (материјала) састоји се од допуштене брзине и брзине одвођења топлоте у околину и одређује се помоћу израза:

$$N_e = N_{dop} + 3,6 \cdot \frac{h_h \cdot \Delta t \cdot 10^3}{r}, \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}, \quad (6.1)$$

где су:

$$N_{dop} = \frac{1800}{d_{pr}}, \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad - \quad \text{допуштена брзина сушења,}$$

$$d_{pr} = \frac{V \cdot 100}{A}, \text{ cm} \quad - \quad \text{привидна дебљина тела,}$$

$$V, \text{ m}^3 \quad - \quad \text{запремина тела,}$$

$$A, \text{ m}^2 \quad - \quad \text{активна површина тела (кроз коју се врши процес сушења),}$$

$$h_h, \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad - \quad \text{коэффицијент прелаза топлоте (са тела на агенс сушења)}$$

$$\Delta t = t_m - t_0, \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad \text{пад температуре,}$$

$$t_m, \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad \text{температура површине тела,}$$

$$t_0, \text{ }^\circ\text{C} \quad - \quad \text{температура околине,}$$

$$r, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad - \quad \text{топлота испаравања за } t = t_m.$$

а специфични топлотни флуks помоћу израза:

$$q = \frac{N_e \cdot r}{10^3}, \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}. \quad (6.2)$$

Пад температуре по дебљини тела (при параболичној расподели температуре) одређује се помоћу израза:

$$\Delta t = \frac{q \cdot D}{4 \cdot 3,6 \cdot \lambda}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.3)$$

где су:

D , m – пречник тела,

λ , $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ – коефицијент провођења топлоте.

Потребна снага одређује се према изразу:

$$P = \frac{N_e \cdot r \cdot A}{3600}, \text{ W}, \quad (6.4)$$

а јачина струје помоћу израза:

$$I = B \cdot \sqrt{\frac{N_e \cdot r}{\rho_e}}, \text{ A}, \quad (6.5)$$

где се бездимензиона величина B одређује помоћу израза:

$$B = \frac{V}{L \cdot 100} \cdot \sqrt{\frac{10^5}{3,6 \cdot d_{pr}}}, \quad (6.6)$$

где су:

ρ_e , $\Omega \cdot \text{cm}$ – специфична електроотпорност тела,

L , cm – дужина тела.

Електрични напон тела одређује се помоћу израза:

$$U = \frac{P}{I}, \text{ V}, \quad (6.7)$$

а електрични отпор помоћу израза:

$$R = \frac{\rho_e \cdot L}{A_p} \frac{\rho_e \cdot L}{\frac{D^2 \cdot \pi}{4}}, \text{ } \Omega, \quad (6.8)$$

где је:

A_p , cm^2 – површина попречног пресека тела.

Снага на почетку загревања тела може се одредити помоћу израза:

$$P = \frac{U^2}{R}, \text{ W}, \quad (6.9)$$

а време потребно за загревање тела одређује се помоћу израза:

$$\tau_z = \frac{V \cdot \rho \cdot \left(c_m + \frac{\tilde{x}_1}{100} \right) \cdot (t_{sr} - t_{m1})}{3,6 \cdot [P_1 + (P_2 - P_1) \cdot 0,67] - \frac{0,67 \cdot A \cdot N_e \cdot r}{1000}}, \text{ h}, \quad (6.10)$$

где су:

c_m , $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет сувог материјала,

P_1, P_2 , W – снага на почетку и на крају загревања материјала,

- $t_{sr} = t_m + k \cdot \Delta t$, °C – средња температура материјала,
 k , – – фактор облика (за цилиндар 0,5, за плочу 0,67),
 t_{m1} , °C – почетна температура материјала

Маса испарене влаге при загревању тела (материјала) може се одредити помоћу израза:

$$\Delta m_W = \left[(N_{dop} - N_1) \cdot 0,67 + N_1 \right] \cdot \tau_z \cdot D \cdot \pi \cdot L, \text{ g} \quad (6.11)$$

где је:

$$N_1 = \left(\frac{\Delta p_W}{6666} \right)^{1,2} \cdot 10^3 = \left(\frac{p_W^z - p_W}{6666} \right)^{1,2} \cdot 10^3, \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \quad \text{– почетна брзина издвајања влаге из материјала.}$$

Промена масеног удела влаге током процеса сушења материјала може се одредити помоћу израза:

$$\Delta \tilde{x} = \frac{\Delta m_W}{V \cdot \rho \cdot 1000} = \frac{\Delta m_W}{\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot L \cdot \rho \cdot 1000}, \% \quad (6.12)$$

Трансформацијом израза (3.5) време сушења материјала у периоду са константном брзином сушења може се одредити помоћу израза:

$$\tau_s = \frac{V \cdot \rho \cdot (\tilde{x}'_1 - \tilde{x}_2) \cdot 10^3}{100 \cdot N_{dop} \cdot A} = \frac{\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot L \cdot \rho \cdot (\tilde{x}'_1 - \tilde{x}_2) \cdot 10^3}{100 \cdot N_{dop} \cdot D \cdot \pi \cdot L}, \text{ h} \quad (6.13)$$

где су:

- \tilde{x}'_1 , % – масени удео влаге у материјалу пре почетка периода са константном брзином сушења,
 \tilde{x}_2 , % – масени удео влаге у материјалу на крају процеса сушења,
 ρ , $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ – густина тела.

Специфична потрошња топлоте по једном килограму испарене влаге може се одредити помоћу израза:

$$q = \frac{360 \cdot \left\{ \left[P_1 + (P_2 - P_1) \cdot 0,67 \right] \cdot \tau_z + \rho \cdot \tau_s \right\}}{\frac{D^2 \cdot \pi}{4} \cdot L \cdot \rho \cdot (\tilde{x}_1 - \tilde{x}_2)}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (6.14)$$

6.2. Задачи

Задатак 6.1. Сушара (слика 6.1) садржи подове постављене у 10 редова, а сваки под се састоји од полица, одвојених на растојању од по 100 mm, сваки под је дубок 38 mm и широк 1 m, са површином сушења 14 m². Ваздух улази у подове (стање 1 на слици 6.1) са температуром 95 °C и апсолутном влажношћу 0,05 $\frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ и

притиском $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Атмосферски ваздух улази у сушару са $25 \text{ }^\circ\text{C}$ и апсолутном влажношћу $0,01 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$. Брзина ваздуха преко подова на улазу у њих износи $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. При сушењу материјал губи влагу константном брзином $7,5 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$. Одредити проценат рецикулационог ваздуха и карактеристике ваздуха у различитим деловима сушаре.

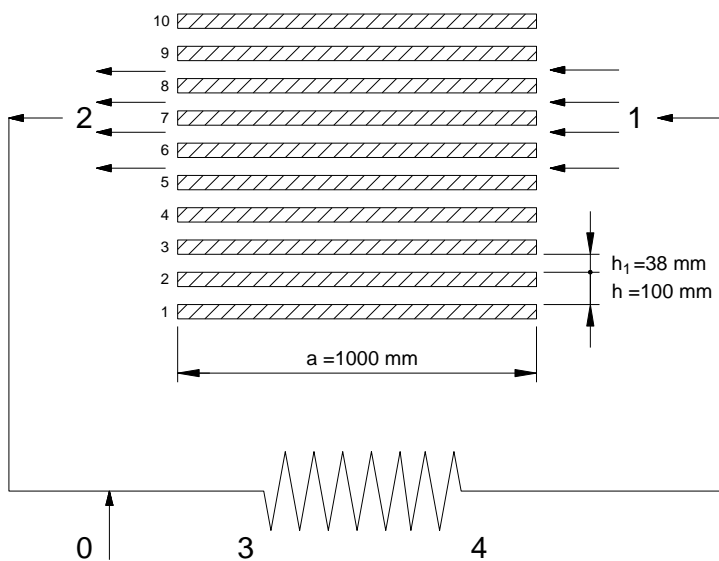
Решење:

У стању 1 је:

$$x_1 = 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad t_1 = 95 \text{ }^\circ\text{C},$$

а специфична запремина влаге према изразу (2.10) је:

$$\begin{aligned} v_w &= (0,00283 + 0,00456 \cdot x_1) \cdot (t_1 + 273) = \\ &= (0,00283 + 0,00456 \cdot 0,05) \cdot (95 + 273) = 1,125 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}. \end{aligned}$$



Слика 6.1. Шема шаржног сушења материјала

Слободан простор за струјање између подова (површина) износи:

$$A = a \cdot (h - h_1) \cdot (n - 1) = 1 \cdot (0,1 - 0,038) \cdot (10 + 1) = 0,682 \text{ m}^2,$$

где су:

- $a = 1 \text{ m}$ – ширина пода,
- $h = 0,1 \text{ m} = 100 \text{ mm}$ – растојање између подова,
- $h_1 = 0,038 \text{ m} = 38 \text{ mm}$ – дубина пода,
- $n = 10$ – број подова.

где су:

$$M_B = 29 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \quad \text{моларна маса ваздуха,}$$

$$M_W = 18 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad - \quad \text{моларна маса воде (влаге),}$$

$$T_0 = 273 + t_0 = 273 + 15 = 288 \text{ K} \quad - \quad \text{апсолутна температура спољашњег ваздуха,}$$

$$T = 273 \text{ K} \quad - \quad \text{референтна температура.}$$

Запремински проток ваздуха за сушење износи (израз (4.94)):

$$\dot{V} = \dot{m}_B \cdot v_{vg} = \frac{1400}{3600} \cdot 0,824 = 0,3204 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1153 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}.$$

Топлота утрoшена за загревање ваздуха у загрејачу ваздуха износи:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_B \cdot c_{pvq} \cdot (t_1 - t_0) = \frac{1400}{3600} \cdot 1,018 \cdot (120 - 15) = 41,5683 \text{ kW} = 149646 \frac{\text{kJ}}{\text{h}},$$

где су:

$$c_{pvq} = c_B + c_{pW} \cdot X_0 =$$

$$= 1,0057 + 1,859 \cdot 0,0068 = 1,018 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad - \quad \text{специфични топлотни капацитет влажног ваздуха на улазу у загрејач,}$$

$$c_B = 1,0057 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

специфични топлотни капацитет апсолутно сувог ваздуха при температури 15 °C,

$$c_{vp} = 1,859 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

специфични топлотни капацитет водене паре при температури 15 °C.

На основу добијених вредности добија се укупна количина топлоте потребна за процес сушења:

$$\dot{Q} = \dot{Q}' + \dot{Q}_u = \frac{471666}{3600} + \frac{149646}{3600} = 172,5867 \text{ kW} = 621312 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}.$$

Ова вредност представља основу за даља израчунавања карактеристика сушаре (потрошњу паре за загревање ваздуха и сл.).

7. ПРОРАЧУН ЦЕВНИХ СУШАРА

7.1. Преглед коришћених једначина

Средња температурска разлика у комори за сушење може се одредити помоћу израза:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_{m1}) + (t_2 - t_{m2})}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (7.1)$$

где су:

- $t_1, \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура агенса сушења на улазу у комору за сушење,
- $t_2, \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура агенса сушења на излазу из коморе за сушење,
- $t_{m1}, \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура материјала на улазу у комору за сушење,
- $t_{m2}, \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура материјала на излазу из коморе за сушење.

Масена концентрација влаге продукта сагоревања дефинише се као однос:

$$\tilde{X}_{Wps} = \frac{\tilde{X}_{Wg}}{\tilde{X}_{Bg}}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (7.2)$$

где су:

- $\tilde{X}_{Wg}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – маса водене паре по килограму горива,
- $\tilde{X}_{Bg}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – маса сувог гаса по килограму горива.

Масена концентрација продукта сагоревања горива на улазу у комору за сушење одређује се у зависности од односа масеног протока влажног материјала и масеног протока продукта сагоревања:

$$\tilde{X}_{ps} = \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_{ps}}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (7.3)$$

где су:

- $\dot{m}_1, \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ – масени проток влажног материјала на улазу у комору за сушење,

$\dot{m}_{ps}, \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ – масени проток продуката сагоревања горива.

Коришћењем израза (7.2) и (7.3) може се одредити масени проток сувих димних гасова према изразу:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_{ps} \cdot \frac{\tilde{X}_{Bg}}{\tilde{X}_{Bg} + \tilde{X}_{Wg}}, \frac{\text{kg}}{\text{h}}. \quad (7.4)$$

Масена концентрација влаге (влажност продуката сагоревања) на излазу из коморе за сушење дефинише се помоћу израза:

$$\tilde{X}_{Wps2} = \tilde{X}_{Wps1} + \frac{\Delta \dot{m}_W}{\dot{m}_B}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \quad (7.5)$$

Према изразима (4.36) и (4.67) специфична количина топлоте која се предаје околина (губици топлоте у околина) може се одредити помоћу израза:

$$q_{ok} = r + q_m - c_W \cdot t_{m1}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad (7.6)$$

где су:

$r, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – топлота испаравања,

$q_m, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – специфична количина топлоте потребна за загревање материјала,

$c_W, \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет влаге у течном стању,

$t_{m1}, ^\circ\text{C}$ – температура материјала на улазу у комору за сушење.

У пракси се за брзину честица материјала на улазу у комору за сушење често користи израз:

$$w_{c1} = 5,22 \cdot \sqrt{\frac{d \cdot \rho_{m1}}{\rho_{g1}}}, \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (7.7)$$

где су:

d, m – максимални пречник честице материјала,

$\rho_{m1}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ – густина материјала на улазу у комору за сушење,

$\rho_{g1}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ – густина димних гасова (продуката сагоревања).

Пречник цевне сушаре може се одредити помоћу израза за одређивање запреминског протока димних гасова:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{g1}}{3600 \cdot \pi \cdot w_{g1}}}, \text{m}, \quad (7.8)$$

где су:

$\dot{V}_{g1}, \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ – запремински проток димних гасова на улазу у комору за сушење,

$w_{g1}, \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – брзина димних гасова на улазу у комору за сушење.

На основу запреминског оптерећења коморе за сушење:

$$\Delta \dot{m}_{Wzap} = \frac{\Delta \dot{m}_W}{V}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}}, \quad (7.9)$$

где је:

V, m^3 – запремина коморе за сушење,

одређује се дужина коморе за сушење:

$$L = \frac{\Delta \dot{m}_W}{\Delta \dot{m}_{Wzap} \cdot n \cdot A}, \text{m}, \quad (7.10)$$

где су:

$n,$ – број комора за сушење,

$A = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}, \text{m}^2$ – површина попречног пресека коморе за сушење.

Време боравка честица материјала у комори за сушење може се одредити помоћу израза:

$$\tau = \frac{L}{w} = \frac{L}{w_{gsr} - w_{csr}}, \text{s}, \quad (7.11)$$

где су:

$w_{gsr}, \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – средња вредност брзине гаса,

$w_{csr}, \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – средња вредност брзине честица материјала.

7.2. Задаци

Задатак 7.1. Одредити површину загревања цевне вакум сушаре капацитета $200 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ осушеног материјала. Почетни масени удео воде износи 50%, а крајњи

5%. Укупни коефицијент преноса топлоте износи $350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, температура сушења

$60 \text{ }^\circ\text{C}$, специфични топлотни капацитет сувог материјала $1,26 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$, почетна

температура материјала $20 \text{ }^\circ\text{C}$, а притисак загревне паре $p = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Губици топлоте износе 10% укупне количине топлоте предате загревном паром.

Решење:

Укупна количина топлоте износи:

Додатна дужина цеви, за честице димензија 0,2–1 mm, може се одредити на основу емпиријског израза:

$$L_d = w \cdot d_{me} = 4,64 \cdot 1 = 4,64 \text{ m},$$

где је:

$d_{me} = 1 \text{ mm}$ – еквивалентни пречник честице.

Према томе, захтевана дужина цеви за сушење износи:

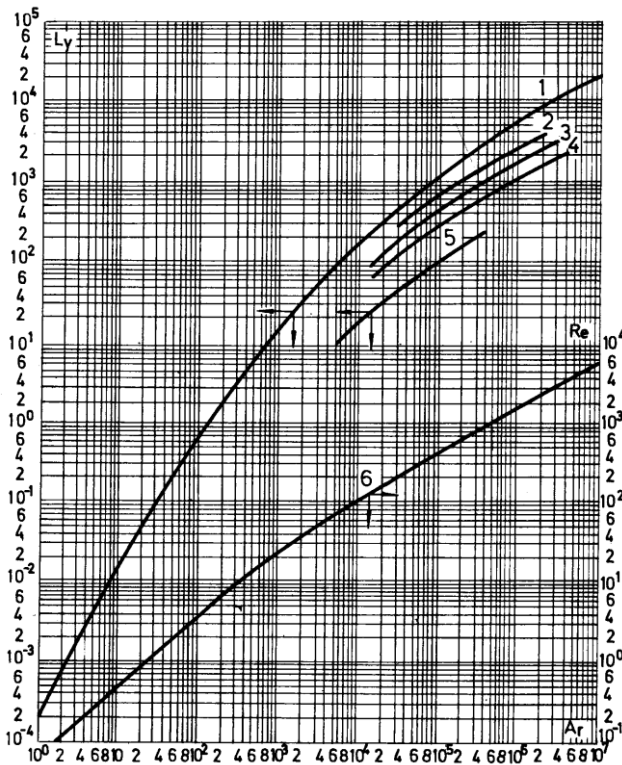
$$L_z = L + L_d = 8,93 + 4,64 = 13,57 \text{ m} \approx 14 \text{ m}.$$

Запремински проток ваздуха износи:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_B}{\rho \cdot 3600} = \frac{2632}{1,029} = 0,71 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2556 \frac{\text{m}^3}{\text{h}},$$

па је сходно изразу (7.8) пречник цеви за сушење:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,71}{\pi \cdot 4,64}} = 0,442 \text{ m}.$$



Слика 7.3. Зависност бројева Re и Ly од броја Ar

- 1 – сферна честица, 2 – честица са заобљеним ивицама, 3 – честица са оштрим (угластим) ивицама, 4 – издужене честице, 5 – плочасте (ламеларне) честице, 6 – сферне честице

8. ПРОРАЧУН СУШЕЊА У КОНТИНУАЛНИМ КОМОРАМА ЗА СУШЕЊЕ СА ДИРЕКТНИМ ЗАГРЕВАЊЕМ

8.1 Преглед коришћених једначина

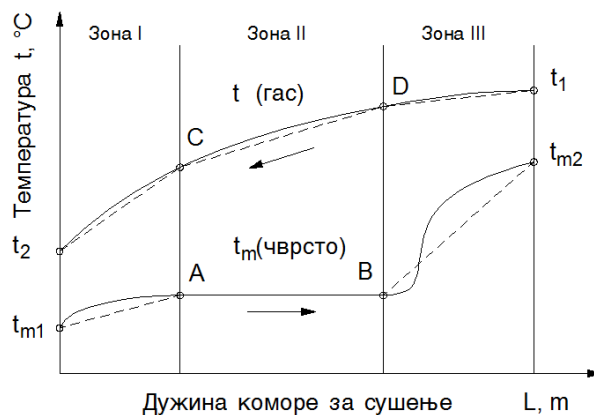
Процеси у континуалним коморама за сушење са директним загревањем могу се поделити у две групе:

- процеси при високим температурама,
- процеси при ниским температурама.

Изложени прорачун се користи само за процену елемената материјалног и топлотног биланса. Може се применити код тунелских и ротационих сушара.

8.1.1. Процес сушења при високим температурама

Обично се разликују три зоне препознатљиве по промени температуре гаса и температуре материјала у различитим деловима коморе за сушење (слика 8.1).



Слика 8.1. Промена температура у континуалној супротносмерној комори за сушење са директним загревањем

Нека је занемарена размена топлоте између материјала коморе и сушеног материјала. У делу коморе диференцијалне дужине dL специфично топлотно оптерећење услед преношења топлоте од гаса, по јединици површине попречног пресека континуалне коморе за сушење је:

$$dq_g = dq + dq_{ok}, \frac{W}{m^2}, \quad (8.1)$$

односно:

$$dq = dq_g - dq_{ok} = k \cdot dS \cdot (t - t_m) = k \cdot a \cdot (t - t_m) \cdot dL, \frac{W}{m^2}, \quad (8.2)$$

где су:

- $q, \frac{W}{m^2}$ – специфично топлотно оптерећење услед топлоте предате сушеном материјалу,
- $q_{ok}, \frac{W}{m^2}$ – специфично топлотно оптерећење услед губитака топлоте у околину,
- $k, \frac{W}{m^2 \cdot K}$ – укупан коефицијент пролажења топлоте,
- $S, \frac{m^2}{m^2}$ – површина свих честица сведена на јединицу површине попречног пресека континуалне коморе за сушење,
- $a, \frac{m^2}{m^3}$ – површина свих честица садржаних у јединичној запремини коморе за сушење,
- L, m – дужина коморе за сушење,
- $t, ^\circ C$ – температура гаса у комори за сушење,
- $t_m, ^\circ C$ – температура сушеног материјала.

Ако се усвоји да је $q_{ok} = 0$, величина dq може се одредити на основу израза:

$$dq = \rho \cdot w_g \cdot c_{pvg} \cdot dt'_g = k \cdot a \cdot (t - t_m) = k \cdot a \cdot (t - t_m) \cdot dL, \frac{W}{m^2}, \quad (8.3)$$

где су:

- $dt'_g, ^\circ C$ – пад температуре гаса у комори за сушење услед предаје топлоте само сушеном материјалу,
- $w_g, \frac{m}{s}$ – брзина гаса по јединици површине попречног пресека континуалне сушаре.

Израз (8.3) може се трансформисати у облик диференцијалне једначине:

$$\frac{dt'_g}{t - t_m} = \frac{k \cdot a \cdot dL}{\rho \cdot w_g \cdot c_{pvg}} = dN_{tug, -}, \quad (8.4)$$

чије је решење, на основу искуства:

$$N_{tug} = \frac{\Delta t'_g}{\Delta t_m} = \frac{L}{H_{tug}}, \quad (8.5)$$

а укупна висина јединица преноса топлоте за гасну фазу:

$$H_{tug} = \frac{\rho \cdot w_g \cdot c_{pvg}}{k \cdot a}, m, \quad (8.6)$$

где су:

- N_{tug} , – укупан број јединица преноса топлоте за гасну фазу,
- $\Delta t'$, °C – промена температуре гаса услед предаје топлоте само сушеном материјалу,
- Δt_m , °C – средња температурска разлика гаса и сушеног материјала.

Израз (8.6) важи при константној вредности коефицијента прелажења топлоте и при промени температуре гаса и температуре материјала приказаној на слици (8.1).

Код индустријских (комерцијалних) сушара вредност производа $k \cdot a$, примењеног у изразима од (8.3) до (8.6) може се одредити коришћењем израза:

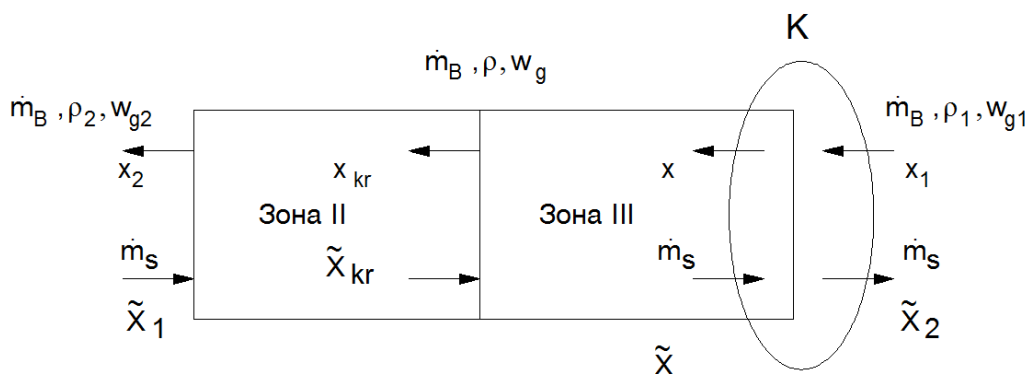
$$k \cdot a = \frac{237 \cdot (\rho \cdot w_g)^{0,67}}{D_{RKS}}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot \frac{m^2}{m^3}, \quad (8.7)$$

где је:

- D_{RKS} , m – пречник радног простора ротационе коморе за сушење.

8.1.2. Процес сушења при ниским температурама (супротносмерна комора за сушење)

Комора за сушење може се поделити на зоне као код коморе за сушење која ради при високим температурама (слика 8.1). Пошто површинска влага испарава при релативно ниским температурама у зони II, зона предгревања материјала се може занемарити па се посматрају само зона II и зона III (слика 8.2).



Слика 8.2. Континуална нискотемпературска супротносмерна комора за сушење са директним загревањем сушеног материјала

Време задржавања материјала у сушари може се на основу једначине (3.4) одредити коришћењем израза (слика 8.2):

$$\tau = \tau_{II} + \tau_{III} = \frac{\dot{m}_s}{A} \cdot \left(\int_{\tilde{X}_{kr}}^{\tilde{X}_1} \frac{d\tilde{X}}{N} + \int_{\tilde{X}_2}^{\tilde{X}_{kr}} \frac{d\tilde{X}}{N} \right), s, \quad (8.8)$$

Брзина сушења у зони II

У зони II (слика 8.2) је $\tilde{X} > \tilde{X}_{kr}$. На основу израза (3.28):

$$N = N_{kr} = \beta_x \cdot (x_{zp} - x), \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}, \quad (8.9)$$

где су:

$\beta_x, \frac{\text{kgsv}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ – коефицијент прелаза супстанције за ваздух,

$x_{zp}, \frac{\text{kgw}}{\text{kgsv}}$ – апсолутна влажност гаса на линији засићења при температури слоја течности на површини материјала,

време сушења у зони II (део израза (8.8)):

$$\tau_{II} = \frac{m_S}{A} \cdot \int_{\tilde{X}_{kr}}^{\tilde{X}_1} \frac{d\tilde{X}}{\beta_x \cdot (x_{zp} - x)}, \text{ s}, \quad (8.10)$$

односно:

$$\tau_{II} = \frac{m_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \int_{\tilde{X}_{kr}}^{\tilde{X}_1} \frac{d\tilde{X}}{x_{zp} - x}, \text{ s}. \quad (8.11)$$

На основу једначине континуитета (слика 8.2):

$$\begin{aligned} \dot{m}_B \cdot dx &= \dot{m}_S \cdot d\tilde{X}, \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \\ d\tilde{X} &= \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot dx, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \end{aligned} \quad (8.12)$$

Израз (8.11) може се написати у облику:

$$\tau_{II} = \frac{m_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \int_{\tilde{X}_{kr}}^{x_2} \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \frac{dx}{x_{zp} - x}, \text{ s},$$

односно:

$$\tau_{II} = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \frac{m_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \int_{\tilde{X}_{kr}}^{x_2} \frac{dx}{x_{zp} - x}, \text{ s}, \quad (8.13)$$

где су:

$\dot{m}_B, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток сувог гаса,

$\dot{m}_S, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток апсолутно сувог материјала.

Реципрочна вредност члана $\frac{m_S}{A}$ у изразу (8.13) назива се специфична површина изложена сушењу $\frac{A}{m_S}$ и има јединицу m^2 површине сушења по килограму апсолутно сувог материјала.

Када је $x_{zp} = const.$ интегралњем израза (8.13) добија се израз:

$$\tau_{II} = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \frac{m_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \ln \frac{x_{zp} - x_{kr}}{x_{zp} - x_2}, \text{ s}, \quad (8.14)$$

или израз, који се такође користи у пракси:

$$\tau_{II} = \frac{\frac{\dot{m}_B}{A_k} \cdot \frac{m_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \ln \frac{x_{zp} - x_{kr}}{x_{zp} - x_2}}{A_k}, \text{ s}, \quad (8.15)$$

где су:

$\frac{\dot{m}_B}{A_k}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ – специфични масени проток сувог гаса,

$\frac{\dot{m}_S}{A_k}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ – специфични масени проток апсолутно сувог гаса,

A_k, m^2 – површина попречног пресека континуалне коморе за сушење са директним загревањем,

$x_{kr}, x_2, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – почетна и крајња апсолутна влажност гаса у зони II (слика 8.2).

Брзина сушења у зони III

У зони III је $\tilde{X} < \tilde{X}_{kr}$ (слика 8.2). На основу израза (3.15) за опадајућу брзину сушења:

$$N = \frac{N_{kr} \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}},$$

и израза (3.28) за константну брзину сушења:

$$N_{kr} = \beta_x \cdot (x_{zp} - x), \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}.$$

Брзина сушења у зони III (слика 8.2) може се приказати изразом:

$$N = \frac{N_{kr} \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r} = \frac{\beta_x \cdot (x_{zp} - x) \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}. \quad (8.16)$$

Заменом израза (8.16) у израз (8.8) добија се израз за време сушења у зони III:

$$\tau_{III} = \frac{m_S}{A} \cdot \int_{\tilde{X}_2}^{\tilde{X}_{kr}} \frac{d\tilde{X}}{N} = \frac{m_S}{A} \cdot \int_{\tilde{X}_2}^{\tilde{X}_{kr}} \frac{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}{\beta_x \cdot (x_{zp} - x) \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)} \cdot d\tilde{X}, \text{ s},$$

$$\tau_{III} = \frac{m_S}{A} \cdot \frac{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}{\beta_x} \cdot \int_{\tilde{X}_2}^{\tilde{X}_{kr}} \frac{d\tilde{X}}{(x_{zp} - x) \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}, \text{ s}. \quad (8.17)$$

Материјални биланс за контуру К на слици (8.2) може се представити изразом:

$$\dot{m}_B \cdot x_1 + \dot{m}_S \cdot \tilde{X} = \dot{m}_B \cdot x + \dot{m}_S \cdot \tilde{X}_2, \frac{\text{kg}}{\text{s}},$$

односно:

$$\frac{\dot{m}_B}{A_k} \cdot x_1 + \frac{\dot{m}_S}{A_k} \cdot \tilde{X} = \frac{\dot{m}_B}{A_k} \cdot x + \frac{\dot{m}_S}{A_k} \cdot \tilde{X}_2, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}},$$

па је величина x :

$$x = x_1 + (\tilde{X} - \tilde{X}_2) \cdot \frac{\dot{m}_S}{\dot{m}_B}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}, \quad (8.18)$$

односно:

$$x = x_1 + (\tilde{X} - \tilde{X}_2) \cdot \frac{\frac{\dot{m}_S}{A_k}}{\frac{\dot{m}_B}{A_k}}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \quad (8.19)$$

Величина \tilde{X} је:

$$\tilde{X} = (x - x_1) \cdot \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} + \tilde{X}_2, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}. \quad (8.20)$$

У случајевима када су $\tilde{X}_r = 0$ и $x_{zp} = 0$ израз (8.17) може се написати у облику:

$$\tau_{III} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{\tilde{X}_{kr}}{\beta_x} \cdot \int_{x_2}^{\tilde{X}_{kr}} \frac{d\tilde{X}}{(x_{zp} - x) \cdot \tilde{X}}, \text{s},$$

односно коришћењем израза (8.12) и израза (8.20):

$$\tau_{III} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{\tilde{X}_{kr}}{\beta_x} \cdot \int_{x_1}^{x_{kr}} \frac{\frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot dx}{(x_{zp} - x) \cdot \left[(x - x_1) \cdot \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} + \tilde{X}_2 \right]}, \text{s},$$

$$\tau_{III} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{\tilde{X}_{kr}}{\beta_x} \cdot \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \int_{x_1}^{x_{kr}} \frac{dx}{(x_{zp} - x) \cdot \left[(x - x_1) \cdot \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} + \tilde{X}_2 \right]}, \text{s}. \quad (8.21)$$

После решавања одређеног интеграла добија се:

$$\tau_{III} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \frac{\tilde{X}_{kr}}{\beta_x} \cdot \frac{1}{(x_{zp} - x_1) \cdot \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} + \tilde{X}_2} \cdot \ln \frac{\tilde{X}_{kr} \cdot (x_{zp} - x_1)}{\tilde{X}_2 \cdot (x_{zp} - x_{kr})}, \text{s}, \quad (8.22)$$

односно:

$$\tau_{III} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{\frac{\dot{m}_B}{A_k}}{\frac{\dot{m}_S}{A_k}} \cdot \frac{\tilde{X}_{kr}}{\beta_x} \cdot \frac{1}{(x_{zp} - x_1) \cdot \frac{\frac{\dot{m}_B}{A_k}}{\frac{\dot{m}_S}{A_k}} + \tilde{X}_2} \cdot \ln \frac{\tilde{X}_{kr} \cdot (x_{zp} - x_1)}{\tilde{X}_2 \cdot (x_{zp} - x_{kr})}, \text{s}. \quad (8.23)$$

8.1.3. Истосмерна комора за сушење

Време сушења у зони II (слика 8.3) може се одредити на основу израза (8.8) и (3.28):

$$\tau_{II} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \int_{\tilde{X}_{kr}}^{\tilde{X}_1} \frac{d\tilde{X}}{N} = \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \int_{\tilde{X}_{kr}}^{\tilde{X}_1} \frac{d\tilde{X}}{x_{zp} - x}, \text{ s,}$$

при чему је (слика 8.3):

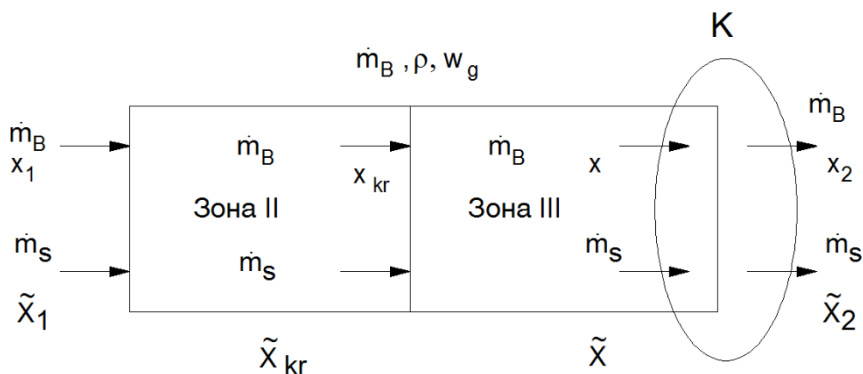
$$\dot{m}_B \cdot dx = -\dot{m}_S \cdot d\tilde{X}, \frac{\text{kg}}{\text{s}},$$

односно:

$$d\tilde{X} = -\frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot dx, \frac{\text{kg}}{\text{kg}},$$

па је величина τ_{II} :

$$\tau_{II} = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \int_{x_1}^{x_{kr}} \frac{dx}{x_{zp} - x}, \text{ s.}$$



Слика 8.3. Континуална нискотемпературска истосмерна комора за сушење

Решавањем одређеног интеграла добија се:

$$\tau_{II} = \frac{\dot{m}_B}{\dot{m}_S} \cdot \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \ln \frac{x_{zp} - x_1}{x_{zp} - x_{kr}}, \text{ s,} \tag{8.24}$$

односно:

$$\tau_{II} = \frac{\dot{m}_B}{\frac{\dot{m}_S}{A_k}} \cdot \frac{\dot{m}_S}{A} \cdot \frac{1}{\beta_x} \cdot \ln \frac{x_{zp} - x_1}{x_{zp} - x_{kr}}, \text{ s.} \tag{8.25}$$

На основу израза (3.15):

$$N = \frac{N_{kr} \cdot (\tilde{X} - \tilde{X}_r)}{\tilde{X}_{kr} - \tilde{X}_r}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}},$$

и израза (3.28):

Маса агенса за другу зону (израз (4.13)) износи:

$$g_{II} = \frac{\dot{m}_B}{\Delta \dot{m}_{WII}} = \frac{7359,48}{117} = 62,90 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

На основу израза (4.13) влажност ваздуха се одређује из израза:

$$g_{II} = \frac{1000}{x'_1 - x_o},$$

одакле се добија:

$$x'_1 = \frac{1000}{g_{II}} + x_o = \frac{1000}{62,90} + 7,56 = 23,46 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

У пресеку вертикале $x'_1 = 23,46 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$ и криве сушења добијају се параметри тачке

B_1 :

$t'_2 = 72 \text{ }^\circ\text{C}$, температура ваздуха,

$\phi'_1 = 12\%$, релативна влажност ваздуха.

Потрошња топлоте за испаравање 1 kg воде се одређује на основу мерења дужи у равнотежном дијаграму "енталпија – састав" и израза (4.26):

$$q = u \cdot \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}} = 1440 \cdot \frac{150}{55} = 3927,27 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Запремински проток ваздуха износи:

- за улазни ваздух у сушару при $t_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\phi_1 = 1\%$:

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_B \cdot v_{vg1} = \frac{7359,48}{3600} \cdot 1,15 = 2,3509 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 8463,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}},$$

- за излазни ваздух из сушаре при $t'_2 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\phi'_2 = 80\%$:

$$\dot{V}_2 = \dot{m}_B \cdot v_{vg2} = \frac{7359,48}{3600} \cdot 0,94 = 1,9216 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 6917,76 \frac{\text{m}^3}{\text{h}},$$

- за прву зону при $t''_2 = 53 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\phi''_2 = 30\%$:

$$\dot{V}_3 = \dot{m}_{B1} \cdot v_{vg3} = \frac{15447,60}{3600} \cdot 0,94 = 4,0335 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 14520,60 \frac{\text{m}^3}{\text{h}},$$

- за рециркулисани ваздуха при $t'_2 = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ и $\phi'_2 = 80\%$:

$$\dot{V}_R = \dot{m}_{BR} \cdot v_{vg2} = \frac{8088,12}{3600} \cdot 0,94 = 2,1119 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 7602,84 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}.$$

Ови протоци се користе за избор вентилатора и димензионисање канала за вођење агенса сушења. За сушару са три канала вредности се увећавају 3 пута са учешћем усисаног хладног ваздуха који износи 10 до 15%.

9. ПРОРАЧУН РОТАЦИОНИХ СУШАРА

9.1. Преглед коришћених једначина

Специфична енталпија чврстог материјала је:

$$h_m = c_s \cdot (t_m - t_0) + \tilde{X} \cdot c_w \cdot (t_m - t_0), \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (9.1)$$

где су:

$c_s, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет апсолутно сувог,

$c_w, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет влаге у течном стању,

$\tilde{X}, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – влажност материјала,

$t_0, ^\circ\text{C}$ – референтна температура,

$t_m, ^\circ\text{C}$ – температура сушеног материјала.

Према изразима (1.13) и (4.14) масени проток влаге кроз комору за сушење је:

$$\dot{m}_s \cdot (\tilde{X}_1 - \tilde{X}_2) = \dot{m}_B \cdot (x_1 - x_2), \frac{\text{kg}}{\text{s}}, \quad (9.2)$$

где су:

$\dot{m}_s, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток апсолутно сувог материјала кроз комору за сушење,

$\dot{m}_B, \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ – масени проток сувог гаса,

$\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – влажност материјала на улазу и излазу из коморе за сушење,

$x_2, x_1, \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$ – влажност гаса на улазу и излазу из коморе за сушење.

Губици топлоте у околину природном конвекцијом и зрачењем одређена је изразом:

$$\dot{Q}_{ок} = k \cdot A \cdot \Delta t_m = k \cdot d \cdot \pi \cdot L \cdot \frac{(t_2 - t_0) + (t_1 - t_0)}{2}, \frac{\text{kJ}}{\text{h}}, \quad (9.3)$$

где су:

- $k, \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ – коефицијент пролажења топлоте,
 A, m^2 – површина размене топлоте,
 $\Delta t_m, ^\circ\text{C}$ – средња температурска разлика гаса за сушење и околног ваздуха,
 d, m – пречник коморе за сушење,
 L, m – дужина коморе за сушење,
 $t_0, ^\circ\text{C}$ – температура околног ваздуха,
 $t_2, t_1, ^\circ\text{C}$ – температура сувог ваздуха на улазу и излазу из у коморе за сушење.

Трансформацијом израза (4.33) топлотни биланс сушаре може се приказати помоћу израза:

$$\dot{m}_S \cdot h'_{m1} + \dot{m}_B \cdot h_2 = \dot{m}_S \cdot h'_{m2} + \dot{m}_B \cdot h_1 + \dot{Q}_{ок}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}, \quad (9.4)$$

или на основу израза:

$$\dot{m}_B \cdot c_{pvg} \cdot (t_2 - t_1) = \dot{m}_S \cdot (h'_{m2} - h'_{m1}) + \eta_{it} \cdot \dot{Q}_{ок}, \quad (9.5)$$

где су:

- $h_2 = (c_{pB} + c_{pW} \cdot x_2) \cdot (t_2 - t_0) + 2500 \cdot x_2, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија гаса на излазу из сушаре,
 $h_1 = (c_{pB} + c_{pW} \cdot x_1) \cdot (t_1 - t_0) + 2500 \cdot x_1, \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија гаса на улазу у сушару,
 $c_{pvg} = c_{pB} + c_{pW} \cdot \tilde{X}, \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ – средњи специфични топлотни капацитет при константном притиску влажног гаса,
 $\eta_{it}, -$ – степен корисности.

Средњи специфични топлотни капацитет сувог гаса може се одредити помоћу израза:

$$c_{pB} = \frac{n_{\text{CO}_2} \cdot c_{p\text{CO}_2} + n_{\text{O}_2} \cdot c_{p\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} \cdot c_{p\text{N}_2}}{n_B \cdot M_B}, \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad (9.6)$$

где су:

- n_i, kmol – број киломолова компоненте у сувим димним гасовима,
 $c_{pi}, \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$ – специфични топлотни капацитет компоненте i ,
 n_B, kmol – број киломолова сувог гаса,
 $M_B, \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ – моларна маса сувог гаса.

Промена температуре сувог гаса не узимајући у обзир топлотне губитке може се одредити помоћу израза:

$$\Delta t = \frac{\dot{m}_S \cdot (h'_{m2} - h'_{m1})}{\dot{m}_B \cdot c_{pvg}}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (9.7)$$

где су:

$h'_{m2}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија материјала при влажности материјала \tilde{X}_1 ,

$h''_{m2}, \frac{\text{J}}{\text{kg}}$ – специфична енталпија материјала при влажности материјала \tilde{X}_2 ,

а средња температурска разлика између сувог гаса и материјала за сушење је:

$$\Delta t_m = \frac{(t_2 - t_{m1}) + (t_1 - t_{m2})}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (9.8)$$

Број јединица преноса топлоте за гасну фазу може се одредити помоћу израза:

$$N_{tug} = \frac{\Delta t}{\Delta t_m}, \text{ } -. \quad (9.9)$$

Специфични масени проток апсолутно сувог материјала може се одредити помоћу израза:

$$\dot{m}'_S = \frac{\dot{m}_S}{A}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}, \quad (9.10)$$

где је:

A, m^2 – површина попречног пресека коморе за сушење,

а специфични проток сувог гаса је:

$$\dot{m}'_B = \frac{\dot{m}_B}{A}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}. \quad (9.11)$$

Средња вредност специфичног протока сувог гаса одређује се помоћу израза:

$$\dot{m}_{Bsr} = \dot{m}'_B \cdot (1 + x_{sr}) = \dot{m}'_B \cdot \left(1 + \frac{x_1 + x_2}{2}\right), \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}. \quad (9.12)$$

Специфично топлотно оптерећење коморе за сушење је:

$$q_g = \frac{237 \cdot \dot{m}_{Bsr}^{0,67}}{D}, \frac{\text{W}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}, \quad (9.13)$$

где је:

D, m – пречник коморе за сушење.

Дужина коморе за сушење одређује се помоћу израза:

$$L = N_{tug} \cdot H_{tug}, \text{ m}, \quad (9.14)$$

где је:

H_{tug}, m – укупна висина јединица преноса топлоте за гасну фазу.

10. ПРОРАЧУН СУШАРА СА ФЛУИДИЗОВАНИМ И ФОНТАНСКИМ СЛОЈЕМ

10.1. Преглед коришћених једначина

10.1.1. Минимална брзина флуидизације

Минимална брзина флуидизације може се одредити коришћењем експерименталних израза приказаних у прилогу III. Алтернативни називи ове величине су: брзина почетка флуидизације, критична брзина флуидизације, прва критична брзина флуидизације.

Архимедов број дефинисан је изразом:

$$Ar = \frac{d_{me}^3 \cdot g}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho}, \quad (10.1)$$

где су:

d_{me} , m – средњи еквивалентни пречник честице сушеног материјала,

g , $\frac{m}{s^2}$ – убрзање силе земљине теже,

ρ_m , $\frac{kg}{m^3}$ – густина чврстих честица (укључујући запремину пора),

ν , $\frac{m^2}{s}$ – кинематска вискозност ваздуха,

ρ , $\frac{kg}{m^3}$ – густина ваздуха.

Густина чврстих честица ρ_m може се разликовати од стварне густине материјала ρ_{ms} . Стварна густина материјала се назива још и густина скелета. Величина ρ_m се у пракси често назива привидна густина, а величина ρ_{ms} стварна густина.

Зависност привидне од стварне густине може се приказати изразом:

$$\rho_m = \frac{1 + \rho \cdot \xi_m}{\frac{1}{\rho_{ms}} + \xi_m}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (10.2)$$

где је:

$\xi_m, \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ – запремина пора по јединици масе чврсте честице.

Порозност слоја материјала је однос укупне запремине простора честица и запремине слоја:

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - \Sigma V_c}{V_{sl}}, -, \quad (10.3)$$

односно:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Sigma V_c}{V_{sl}} = 1 - \frac{m_{sl}}{V_{sl}} \cdot \frac{1}{\frac{\Sigma V_c}{m_c}}, -,$$

односно:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_\varepsilon}{\rho_m}, -, \quad (10.4)$$

при чему је насипна густина слоја:

$$\rho_\varepsilon = \frac{m_{sl}}{V_{sl}}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (10.5)$$

а густина чврстих честица:

$$\rho_m = \frac{m_c}{\Sigma V_c}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad (10.6)$$

где су

V_{sl}, m^3 – запремина слоја (насутог, флуидизованог),

$\Sigma V_c, \text{m}^3$ – запремина свих честица слоја,

m_{sl}, kg – маса слоја (насутог, флуидизованог),

m_c, kg – маса честица слоја.

На основу израза (10.4) може се извести зависност:

$$\rho_m = \frac{\rho_\varepsilon}{1 - \varepsilon}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

односно:

$$\rho_\varepsilon = \rho_m \cdot (1 - \varepsilon), \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}. \quad (10.8)$$

За одређивање минималне брзине флуидизације често се користи Тодесов (Тодес) израз:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot \varepsilon^{4,75}}}, -, \quad (10.9)$$

Када је $\varepsilon = 0,4$ из израза (10.9) настаје израз:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \cdot 0,4^{4,75}}{18 + 0,61 \cdot \sqrt{\text{Ar} \cdot 0,4^{4,75}}}, -,$$

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar}}{1406 + 5,41 \cdot \sqrt{\text{Ar}}}, -.$$
(10.10)

Зависност висине флуидизованог слоја од порозности или од густине слоја може се представити изразом:

$$\frac{H}{H_{mf}} = \frac{1 - \varepsilon_{mf}}{1 - \varepsilon} = \frac{\rho_{\varepsilon mf}}{\rho_{\varepsilon}}, -,$$
(10.11)

односно:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon} = \frac{\rho_0}{\rho_{\varepsilon}}, -,$$
(10.12)

где су:

- $H_0, \text{ m}$ – висина насутог слоја,
- $H, \text{ m}$ – висина флуидизованог слоја,
- $H_{mf}, \text{ m}$ – висина слоја у условима минималне флуидизације,
- $\varepsilon_0, -$ – порозност насутог слоја,
- $\varepsilon, -$ – порозност флуидизованог слоја,
- $\varepsilon_{mf}, -$ – порозност слоја у условима минималне флуидизације,
- $\rho_0, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ – насипна густина слоја,
- $\rho_{\varepsilon}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ – густина флуидизованог слоја,
- $\rho_{\varepsilon mf}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ – густина слоја у условима минималне флуидизације.

Из израза (10.12) може се извести зависност:

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_0}{H} \cdot (1 - \varepsilon_0), -,$$
(10.13)

а на основу израза (10.9):

$$\varepsilon = \left(\frac{18 \cdot \text{Re} + 0,36 \cdot \text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0,21}, -.$$
(10.14)

Изрази од (10.9) до (10.14) важе само за флуидизоване слојеве без мехурова.

Рејнолдсов број дефинисан минималном брзином флуидизације је:

$$\text{Re}_{mf} = \frac{d_{me} \cdot w_{mf}}{\nu}, -,$$
(10.15)

где је:

- $w_{mf}, \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – минимална брзина флуидизације рачуната по целом попречном пресеку слоја.

Средњи еквивалентни пречник честице може бити дефинисан као геометријска средња вредност:

$$d_{me} = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}}, \text{ m}, \quad (10.16)$$

где су:

- d_i , m, mm, μm – величина најмањег отвора сита кроз који је честица пропала,
 d_{i+1} , m, mm, μm – величина највећег отвора сита кроз који честица није прошла приликом просејавања.

Фактор облика честице узима у обзир одступање облика честице од сферног. Може се дефинисати изразом:

$$\phi = \frac{A_{sf}}{A_c}, \text{ --}, \quad (10.17)$$

где су:

- A_{sf} , m^2 – површина сфере чија је запремина једнака запремини честице,
 A_c , m^2 – површина честице.

Површина свих честица садржаних у јединичној запремини слоја може се одредити на основу израза:

$$a = \frac{n \cdot A_c}{V_{sl}}, \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}, \quad (10.18)$$

где је:

n , -- – број честица у слоју.

На основу израза (10.17) следи:

$$A_c = \frac{A_{sf}}{\phi} = \frac{d_{me}^2 \cdot \pi}{\phi}, \text{ m}^2. \quad (10.19)$$

Величина V_{sl} се може одредити коришћењем израза (10.3):

$$\varepsilon = \frac{V_{sl} - \sum V_c}{V_{sl}}, \text{ --},$$

$$V_{sl} = \frac{\sum V_c}{1 - \varepsilon} = \frac{n \cdot \frac{d_{me}^3 \cdot \pi}{6}}{1 - \varepsilon}, \text{ m}^3. \quad (10.20)$$

Заменом израза (10.19) и израза (10.20) у израз (10.18) добија се:

$$a = \frac{\frac{n \cdot \frac{d_{me}^3 \cdot \pi}{6}}{\phi}}{\frac{n \cdot \frac{d_{me}^3 \cdot \pi}{6}}{1 - \varepsilon}} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_{me} \cdot \phi}, \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}. \quad (10.21)$$

Критеријални број Федорова (Федоров) је:

$$Fe = \sqrt[3]{\frac{4}{3} \cdot Ar}, \text{ --}. \quad (10.22)$$

10.1.2. Горња гранична брзина флуидизованог стања

За горњу граничну брзину флуидизованог стања монодисперзног материјала може се усвојити брзина таложења усамљене честице у бесконачном флуидном простору. За полудисперзни материјал се усваја брзина таложења најмање честице.

Равнотежу сферне честице која усамљено пада одређују сила потиска:

$$F_p = \rho \cdot g \cdot V_c, \text{ N}, \quad (10.23)$$

сила земљине теже:

$$F_g = \rho_m \cdot g \cdot V_c, \text{ N}, \quad (10.24)$$

сила отпора:

$$F_{ot} = \zeta \cdot \frac{d_{sf}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{w_t^2}{2} \cdot \rho, \text{ N}, \quad (10.25)$$

где су:

ζ , – коефицијент отпора честице,

d_{sf} , m – пречник сферне честице,

w_t , $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ – брзина таложења усамљене честице у бесконачном флуидном простору.

На основу услова равнотеже:

$$F_g = F_p + F_{ot}, \text{ N}, \quad (10.26)$$

односно:

$$F_g - F_p = F_{ot}, \text{ N}.$$

Заменом израза (10.23), (10.24) и (10.25) добија се:

$$\rho_m \cdot g \cdot V_c - \rho \cdot g \cdot V_c = \zeta \cdot \frac{d_{sf}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{w_t^2}{2} \cdot \rho, \text{ N}, \quad (10.27)$$

$$g \cdot V_c \cdot (\rho_m - \rho) = g \cdot \frac{d_{sf}^3 \cdot \pi}{6} \cdot (\rho_m - \rho) = \zeta \cdot \frac{d_{sf}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{w_t^2}{2} \cdot \rho, \text{ N},$$

па је брзина таложења усамљене сферне честице у бесконачном флуидном простору:

$$w_t = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{1}{\zeta} \cdot \frac{\rho_m - \rho}{\rho} \cdot d_{sf} \cdot g}, \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (10.28)$$

У прилогу IV су приказани експериментални изрази за одређивање брзине таложења честице. Рејнолдсов број дефинисан брзином таложења честице је:

$$\text{Re} = \frac{d_{me} \cdot w_t}{\nu}, \text{ --}, \quad (10.29)$$

Пинчбек (Pincbeck) и Попер (Popper) су на основу експеримената одредили однос брзине слободног пада и минималне брзине флуидизације:

$$\text{при } \text{Re} < 0,4 \text{ је } \frac{w_t}{w_{mf}} = 91,6, \quad (10.30)$$

Висина слоја у динамичком стању износи:

$$h_{sl,din} = h_k + \frac{4 \cdot (V_{sl,din} - V_k)}{\pi \cdot d_c^2} = 0,618 + \frac{4 \cdot (0,138 - 0,043)}{\pi \cdot 0,585^2} = 0,971 \text{ m.}$$

Висина цилиндричног дела сушаре износи:

$$h_c = h_{sl,din} - h_k + h_{iz} + 0,3 \cdot d_c = 0,971 - 0,618 + 0,12 + 0,3 \cdot 0,585 = 0,648 \text{ m,}$$

где је:

$h_{iz} = 0,12 \text{ m}$ – висина заштите излазног дела (усвојена вредност).

Запремина сушаре износи:

$$V_{ks} = V_k + V_c = V_k + \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \cdot h_c = 0,043 + \frac{\pi \cdot 0,585^2}{4} \cdot 0,648 = 0,217 \text{ m}^3.$$

Сагласно изразу (4.94) запремински проток гасова на излазу износи:

$$\dot{V}_{g2} = \dot{m}_B \cdot v_{g2} = 0,446 \cdot 1,19 = 0,53 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 1908 \frac{\text{m}^3}{\text{h}},$$

где је:

$$\begin{aligned} v_{g2} &= 22,4 \cdot \left(\frac{1}{M_B} + \frac{x_2}{M_W} \right) \cdot \frac{273 + t_2}{273} = \\ &= 22,4 \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{0,027}{18} \right) \cdot \frac{273 + 128,6}{273} = 1,19 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{aligned} \quad \text{— специфична запремина гасова на излазу.}$$

Пречник отвора за излаз гасова из сушаре износи:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{g2}}{\pi \cdot w_2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,53}{\pi \cdot 25}} = 0,164 \text{ m,}$$

где је:

$w_2 = 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – брзина гасова на излазу из сушаре (усвојена вредност).