



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, Махине 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: