

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТОРГІВЛІ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ТУГАН-БАРАНОВСЬКОГО
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ І ТОРГІВЛІ

А. М. Поперечний, В. О. Потапов, В. Г. Корнійчук

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ТА ОБЛАДНАННЯ
ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ
ПІДРУЧНИК

*Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України
для студентів вищих навчальних закладів*

Київ
«Центр учбової літератури»
2012

УДК [001.891.54:66403](075.8)

ББК 36.81–5в6я73

П 57

*Гриф надано
Міністерством освіти і науки України
(Лист № 1/11-3023 від 13.04.2010 р.)*

Рецензенти:

Богомолов О. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри механізації, зберігання та переробки сільськогосподарської продукції Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка;

Бурдо О. Г. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів і апаратів Одеської національної академії харчових технологій;

Лаврінченко Н. М. – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри вищої і прикладної математики Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган -Барановського;

Недопекін Ф. В. – доктор технічних наук, професор кафедри фізики нерівноважних процесів, метрології і екології Донецького національного університету.

Поперечний А. М., Потапов В. О., Корнійчук В. Г.

П 57 Моделювання процесів та обладнання харчових виробництв. Підручник. – К.: Центр учбової літератури, 2012. – 312 с.

ISBN 978-611-01-0335-0

Підручник містить матеріал з дисципліни «Моделювання процесів і обладнання харчових виробництв». В роботі розглянуті питання, які пов'язані з моделюванням процесів і обладнання харчових виробництв, та роллю моделювання в проведенні науково-дослідних і конструкторських робіт. Особлива увага приділена існуючим методам моделювання, їх класифікації і областям застосування. Показані переваги і недоліки кожного з методів моделювання.

Для студентів вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації за спеціальністю «Обладнання переробних і харчових виробництв». Підручник буде корисним аспірантам, науковим співробітникам, інженерно-технічним працівникам харчової і суміжних галузей промисловості, які займаються питаннями розробки технологічного обладнання.

УДК [001.891.54:66403](075.8)

ББК 36.81–5в6я73

ISBN 978-611-01-0335-0

© Поперечний А. М., Потапов В. О.,
Корнійчук В. Г., 2012.

© Центр учбової літератури, 2012.

ЗМІСТ

Вступ	8
Частина 1. Теоретичні основи моделювання та оптимізації основних процесів і обладнання харчових виробництв ..	12
1. Методи дослідження та аналізу процесів і обладнання харчових виробництв	12
1.1. Особливості процесів та обладнання харчових виробництв	12
1.2. Харчове підприємство – складна багаторівнева система .	13
1.3. Цілі та методи досліджень процесів та обладнання харчових виробництв	17
1.4. Основні методи моделювання та класифікація моделей ..	24
1.5. Тести для перевірки знань.....	27
2. Фізичне моделювання	29
2.1. Теорія подібності – апарат фізичного моделювання	29
2.2. Основи теорії подібності, види подібності	30
2.3. Теореми подібності	32
2.4. Критерії подібності	36
2.5. Приклади застосування теорії подібності	40
2.6. Моделювання процесів методом аналізу розмірностей	45
2.7. Приклади застосування методу аналізу розмірностей ..	48
2.8. Переваги та недоліки методу фізичного моделювання ..	50
2.9. Контрольні питання, завдання та тести для перевірки знань	53
3. Математичне моделювання	57
3.1. Основні визначення та завдання математичного моделювання	57

3.2. Основні напрями побудови математичних моделей	61
3.3. Побудова математичних моделей об'єктів на базі фундаментальних законів	62
3. 4. Класифікація математичних моделей процесів харчових виробництв	64
3.5. Схема побудови математичних моделей процесів харчових виробництв	65
3.6. Методи математичного опису об'єкта	67
3.7. Аналітичні методи моделювання	70
3.7.1. Термодинамічні методи опису систем	70
3.7.2. Феноменологічний метод опису систем	73
3.8. Контрольні питання та тести для перевірки знань	76
4. Статистичні математичні моделі	79
4.1. Терміни та визначення, які використовуються при побудові статистичних моделей	80
4.2. Статистичні моделі на основі пасивного експерименту ..	82
4.3. Статистичні моделі на основі активного експерименту ..	86
4.4. Перевірка адекватності математичних моделей	93
4.5. Приклад побудови статистичної моделі двофакторного експерименту	95
4.6. Тести для перевірки знань	99
5. Інші методи моделювання	101
5.1. Аналогове моделювання	101
5.2. Моделювання конструювання технологічного обладнання	110
5.3. Моделювання основних реологічних властивостей харчових продуктів	118
5.4. Тести для перевірки знань	127
6. Методи статичної оптимізації об'єктів дослідження	129

6.1. Метод Гауса–Зейделя	133
6.2. Метод випадкового пошуку	133
6.3. Метод симплексів	134
6.4. Метод градієнта	137
6.5. Метод крутого сходження	138
6.6. Тести для перевірки знань	139
Частина 2. Математичні моделі основних процесів та обладнання харчових виробництв	142
7. Моделювання механічних процесів	142
7.1. Моделювання процесу подрібнення в апаратах безперервної дії	142
7.2. Моделювання процесів перемішування	150
7.3. Моделювання процесів брикетування харчових продуктів	153
7.4. Контрольні питання та тести для перевірки знань	155
8. Моделювання гідродинамічних процесів	157
8.1. Типові гідродинамічні моделі	158
8.1.1. Модель ідеального перемішування	160
8.1.2. Модель ідеального витіснення	165
8.1.3. Дифузійна модель	167
8.1.4. Ячейкова модель (модель комірок)	170
8.1.5. Комбіновані моделі	173
8.2. Система рівнянь Нав'є–Стокса при моделюванні руху малих тіл	176
8.3. Система рівнянь Нав'є–Стокса у випадку моделювання руху рідини у приграничному шарі	180
8.4. Моделювання течії рідини з використанням рівнянь ньютонівської динаміки	184
8.4.1. Моделювання процесів осадження	184

8.4.3. Моделювання течії в'язкої рідини у роторно-плівковому випарному апараті	190
8.4.4. Моделювання течії неньютонівської рідини у круглomu трубопроводі	192
8.4.5. Моделювання процесу фільтрування	194
8.5. Тести для перевірки знань	198
9. Моделювання теплообмінних процесів	200
9.1. Основні фізичні закони та методи моделювання теплообмінних процесів	200
9.2. Типові моделі теплообмінних процесів	203
9.3. Моделювання динаміки нагрівання та охолодження	209
9.4. Методи моделювання теплообмінників	214
9.4.1. Модель рекуперативного теплообмінника із зосередженими параметрами	214
9.4.2. Модель рекуперативного теплообмінника із розподіленими параметрами	220
9.4.3. Модель змішувального теплообмінника	223
9.5. Моделювання процесу варіння	226
9.6. Моделювання процесу смаження	230
9.7. Моделювання процесів радіаційного нагрівання	236
9.8. Моделювання процесів охолодження та заморожування	241
9.9. Контрольні питання та тести для перевірки знань	245
10. Моделювання масообмінних процесів	247
10.1. Основні масообмінні процеси харчових технологій та методи моделювання	248
10.2. Моделювання протитечійного процесу абсорбційного апарата	253
10.3. Моделювання процесу екстрагування	255

Моделювання процесів та обладнання харчових виробництв

10.4. Моделювання процесу адсорбції	257
10.5. Моделювання процесу сушіння	262
10.5.1. Моделювання кінетики масоперенесення	265
10.5.2. Моделювання кінетики теплоперенесення	268
10.5.3. Моделювання кінетики високотемпературних методів сушіння	271
10.5.4. Моделювання кінетики деформації у процесі сушіння	275
10.6. Контрольні питання та тести для перевірки знань	277
11. Моделювання хімічних та біохімічних процесів	280
11.1. Основні закони хімічної кінетики та методи моделювання хімічних реакцій	280
11.2. Основні закони біохімічної кінетики та методи моделювання біохімічних реакцій	286
11.3. Контрольні питання та тести для перевірки знань	291
Висновки	293
Література	297
Додатки	300

ВСТУП

Розвиток усіх галузей сучасної системи господарювання потребує глибоких наукових досліджень – пошуків та експериментів, а також проектно-конструкторських і техніко-економічних розробок.

Тісний зв'язок науки і виробництва обумовлює нероздільність наукової та інженерної діяльності. В умовах науково-технічного прогресу процес підготовки спеціалістів повинен включати знання класичних і новітніх методів проведення наукового дослідження, уміння використати ті або інші з них залежно від складності вирішуваної проблеми та реальних умов практичної роботи.

Дисципліна «Моделювання процесів та обладнання харчових виробництв» належить до спеціальних дисциплін і є однією із завершуючих підготовку магістрів для напряму підготовки 050503 «Машинобудування» по спеціальності 8.090221 «Обладнання переробних і харчових виробництв». Відповідно до навчального плану цієї спеціальності курс «Моделювання процесів і обладнання харчових виробництв» вивчається як комплексний за змістом серед таких профільюючих дисциплін як «Методологія наукових досліджень», «Методологія створення прогресивного технологічного обладнання переробних і харчових виробництв», «Розрахунки та конструювання апаратів галузі», «Система автоматизованого проектування обладнання харчових виробництв» та «Теоретичні основи і сучасні методи інтенсифікації технологічних процесів харчових виробництв». З більшості цих дисциплін відсутні підручники та навчальні посібники.

Традиційні методи розрахунку процесів і обладнання по осереднених характеристиках не дозволяють розраховувати їх з достатньою точністю, виконувати надійну техніко-економічну оптимізацію. У зв'язку з потребами практики все більше досліджень і публікацій присвячуються застосуванню методів обчислювальної математики та викладенню алгоритмів вирішення задач теорії гідродинаміки, теплообміну і розрахунку відповідної апаратури. На сьогодні не існує видання, в якому б був систематизований мате-

ріал по різноманітних методах моделювання процесів і обладнання харчових виробництв. У цьому підручнику автори намагалися ліквідувати існуючі прогалини та викласти для студентів у доступній і достатньо популярній формі основні положення моделювання.

Мета дисципліни – оволодіння студентами необхідними знаннями з моделювання процесів і обладнання харчових виробництв за наступними напрямками:

- етапи створення нових процесів та обладнання харчових виробництв;
- фізичне моделювання;
- математичне моделювання;
- використання фізичних, математичних та інших видів моделей при вивченні процесів і апаратів харчових виробництв.

Підручник складається з двох частин:

1) Теоретичні основи моделювання та оптимізації основних процесів і обладнання харчових виробництв;

2) Математичні моделі основних процесів і обладнання харчових виробництв.

Перша частина включає шість розділів, друга – п'ять.

У першому і другому розділах висвітлюються методи дослідження й аналізу процесів та обладнання харчових виробництв, а також метод фізичного моделювання. Наведено теореми подібності, найбільш часто використовувані критерії подібності, приклади використання методу фізичного моделювання. Дається інформація про моделювання процесів методом аналізу розмінностей, а також переваги і недоліки методу фізичного моделювання.

Третій розділ присвячений методу математичного моделювання на базі фундаментальних законів. Наведено основні напрями побудови математичних моделей, їх класифікація, схема побудови математичної моделі.

У четвертому розділі розглядається метод математичного моделювання на основі статистичних моделей. Дається коротка інформація по термінах і визначеннях, які використовуються при їх побудові. Показано порядок побудови цих моделей на основі пасивного і активного експерименту, а також методи перевірки адекватності математичних моделей.

У п'ятому розділі на окремих прикладах розглянуто закономірності аналогового моделювання, моделювання конструктивного

устрою технологічного обладнання та основних реологічних властивостей харчових продуктів.

Шостий розділ присвячений статичній оптимізації об'єктів експериментальних досліджень.

Розділи 7–11 присвячені основним механічним, гідродинамічним, тепловим, масообмінним, хімічним і біохімічним процесам харчової технології. Велика увага приділяється гідродинамічним моделям, оскільки гідродинамічна обстановка в апараті значно впливає на процеси, які в ньому відбуваються. Наводяться приклади побудови моделей теплообмінних, масообмінних і механічних процесів, а також математичного, фізичного та інших методів моделювання.

Підручник складений на основі курсу лекцій та практичних занять з моделювання процесів і обладнання харчових виробництв, які упродовж декількох років проводяться в Донецькому національному університеті економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського та Харківському державному університеті харчування і торгівлі.

У ньому наводяться як загальновідомі теоретичні основи моделювання, так і моделі основних процесів та обладнання харчових виробництв, запропоновані авторами.

Підручник призначений для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за спеціальностями, пов'язаними з обладнанням по виробництву харчової продукції. Він може використовуватися при вивченні профільюючих дисциплін по спеціальності, сприяє освоєнню способів вирішення задач по курсах «Процеси і апарати харчових виробництв», «Технологічне обладнання харчових виробництв» та інших, а також при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт. Ним можуть скористатися магістри, спеціалісти та аспіранти по обладнанню хімічних, нафтохімічних, біохімічних, целюлозно-паперових та інших виробництв.

У даному підручнику використана модульна система із збереженням класичної послідовності викладення матеріалу.

Вважаємо своїм обов'язком висловити подяку рецензентам за корисні поради й зауваження по змісту підручника професорам О.В. Богомолу, О.Г. Бурдо, Н.М. Лавріненко, Ф.В. Недопекіну, О.Ю. Шевченко, В.С. Бодрову, Я.М. Корнієнко, В. М. Марчевському.

Автори не претендують на повне і детальне висвітлення всіх аспектів моделювання технологічних процесів та обладнання харчових виробництв і будуть вдячні за побажання та зауваження, висловлені зацікавленими читачами. Просимо направляти їх за адресою: 83055 м. Донецьк, проспект Театральний 28, кафедра обладнання харчових виробництв ДонНУЕТ імені Михайла Туган-Барановського.