

Міністерство освіти і науки України
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

**КОНСТРУКЦІЇ І РОЗРАХУНКИ МАШИН
ТА АПАРАТІВ ПЕРЕРОБНИХ
ВИРОБНИЦТВ**

Підручник для здобувачів вищої освіти

Мелітополь
2021

УДК 664.002.5(075)
К 65

*Рекомендовано Вченою радою Таврійського державного агротехнологічного
університету імені Дмитра Моторного як підручник
для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр» зі спеціальності
133 «Галузеве машинобудування»
зкладів вищої освіти III–IV рівня акредитації
(Протокол № 8 від 24.05.2021 р.)*

Авторський колектив:

Бойко В.С., кандидат технічних наук, доцент; **Самойчук К.О.**, доктор технічних наук, професор; **Тарасенко В.Г.**, кандидат технічних наук, доцент; **Ломейко О.П.**, кандидат технічних наук, доцент; **Олексієнко В.О.**, кандидат технічних наук, доцент; **Петриченко С.В.**, кандидат технічних наук, доцент; **Пупинін А.А.**, інженер, **Гавдида Г.І.**, інженер

Рецензенти:

Дейниченко Г.В., доктор технічних наук, завідувач кафедри процесів та устаткування харчової і готельно–ресторанної індустрії ім. М.І.Беляєва Харківського державного університету харчування і торгівлі

Караєв О.Г., доктор технічних наук, завідувач кафедри сільськогосподарських машин Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

К 65 Конструкції і розрахунки машин та апаратів переробних виробництв: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко, В.О. Олексієнко, С.В. Петриченко, А.А. Пупинін, Г.І. Гавдида. Мелітополь. 2021. 308 с.

ISBN

Підручник «Конструкції і розрахунок машин та апаратів переробних виробництв» призначений для здобувачів ступеня вищої освіти зі спеціальностей «Галузеве машинобудування» і «Харчові технології», магістрів, аспірантів, викладачів і працівників агропромислового комплексу.

ISBN

УДК 664.002.5(075)

© Бойко В.С., Самойчук К.О., Тарасенко В.Г., Ломейко О.П., Олексієнко В.О., Петриченко С.В., Пупинін А.А., Гавдида Г.І.

© Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, 2021

ЗМІСТ

Передмова	8
РОЗДІЛ 1. МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПІЛЬНИХ ТЕПЛО – МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ	9
1.1 Обладнання та машини для сушіння харчових продуктів	9
1.1.1. Характеристика процесу сушіння	9
1.1.2. Класифікація сушильних машин	10
1.1.3. Конструкції та розрахунки сушильних машин	12
1.1.3.1. Конвективне сушіння матеріалів	12
1.1.3.2. Кондуктивний спосіб сушіння	25
1.1.3.3. Сублімаційне сушіння продуктів	29
1.1.3.4. Спеціальні методи сушіння	31
1.2. Конструкції та розрахунок параметрів камерних сушильних апаратів	36
1.2.1. Способи підведення теплоти та чинники процесу сушіння	36
1.2.2. Загальні способи процесу сушіння	40
1.2.3. Конструкції і розрахунок пневматичної сушарки	44
1.2.4. Конструкції і розрахунок камерної сушарки	48
1.2.4.1. Конструкції камерних сушильних апаратів	48
1.2.4.2. Теоретичні основи розрахунку камерної сушарки	52
1.2.5. Розрахунок конструктивних параметрів камерної сушарки	57
1.3. Конструкції і розрахунок робочих елементів машин з оболонками що повільно обертаються	61
1.3.1. Технологічний процес видалення вологи методом сушіння	61
1.3.2. Конструкції та принцип дії барабанних сушарок	64
1.3.3. Теоретичні основи розрахунку барабанної сушарки	71
1.3.4. Розрахунок конструктивних параметрів барабанної сушарки	74
1.3.5. Елементи теорії розрахунку машини з оболонкою	75
1.3.6. Розрахунок параметрів барабанної машини з оболонкою	80
1.4. Розрахунки конвективних сушарок графоаналітичним методом	85
1.4.1. Наукові основи процесу сушіння вологих продуктів	85
1.4.2. Будова I–d діаграми стану вологого повітря	90
1.4.3. Варіанти процесу сушіння з застосуванням I–d діаграми	93
1.4.4. Теоретичний розрахунок робочого процесу сушарки	96
1.4.5. Розрахунок конструктивних параметрів тунельної сушарки	100
1.4.6. Розрахунок дійсного робочого процесу сушарки	101

1.5. Конструкції і розрахунок апаратів для простої дистиляції сумішей	106
1.5.1. Дистиляція бінарних сумішей	106
1.5.1.1. Сутність процесу простої дистиляції	106
1.5.1.2. Апарати для проведення простої перегонки	109
1.5.2. Методи проведення простої дистиляції	111
1.5.2.1. Бінарна проста дистиляція	111
1.5.2.2. Фракційна дистиляція	112
1.5.2.3. Проста дистиляція з дефлегмацією	115
1.5.2.4. Дистиляція з водяною парою	116
1.5.3. Додаткове обладнання для виробництва спирту	118
1.5.3.1. Технологічна схема підготовки сировини	118
1.5.3.2. Змішувач – передрозварник	119
1.5.3.3. Варочні апарати	120
1.5.3.4. Апарати для охолодження і оцукрювання	124
1.5.3.5. Бродильні чани	125
1.6. Розрахунок процесу перегонки бінарних сумішей в ректифікаційних колонах	129
1.6.1. Фізико – хімічні основи процесу ректифікації	129
1.6.2. Принцип дії браго ректифікаційних пристроїв	134
1.6.3. Принципові схеми процесів ректифікації, та будова ректифікаційних колон	137
1.6.3.1. Періодично діючі ректифікаційні установки	137
1.6.3.2. Екстрактивна ректифікація	138
1.6.3.3. Азеотропна ректифікація	140
1.6.4. Елементи теорії та розрахунок ректифікаційної колони	142
РОЗДІЛ 2. АПАРАТИ ТА МАШИНИ ДЛЯ МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ	147
2.7. Теоретичні основи і машинно–апаратне оформлення сорбційних процесів	147
2.7.1. Характеристика процесу сорбції	147
2.7.1.1. Загальні відомості	147
2.7.1.2. Сутність процесу абсорбції	148
2.7.2. Конструкції і принцип дії абсорберів	151
2.7.2.1. Поверхневі абсорбери	151
2.7.2.2. Барботажні абсорбери	152
2.7.2.3. Розпилювальні абсорбери	155
2.7.3. Конструкції і розрахунок плівкових абсорберів	156
2.7.3.1. Типи плівкових абсорберів	156
2.7.3.2. Елементи теорії розрахунку плівкових абсорберів	158

2.8. Будова, принцип дії і розрахунок абсорбційних апаратів	163
2.8.1. Загальні відомості з процесу абсорбції	163
2.8.1.1. Технологія проведення процесу	163
2.8.1.2. Принципові схеми абсорбції	164
2.8.2. Класифікація і конструкційні схеми абсорберів	167
2.8.2.1. Класифікація абсорберів	167
2.8.2.2. Основні критерії вибору абсорберів	170
2.8.3. Характеристика та будова абсорбційних апаратів	171
2.8.3.1. Тарільчасті барботажні колони	171
2.8.3.2. Розпилюючі абсорбери	174
2.8.3.3. Абсорбери з механічним перемішуванням	175
2.8.3.4. Колони абсорбції з псевдозрідженим шаром	175
2.8.4. Теоретичні основи процесу абсорбції	176
2.8.4.1. Елементи теорії розрахунку абсорберів	176
2.8.5. Розрахунок основних параметрів абсорберів	181
2.8.5.1. Конструкції насадкових абсорберів	181
2.8.5.2. Розрахунок насадкового абсорбера	183
2.9. Теоретичні основи і машино – апаратне забезпечення процесу адсорбції	188
2.9.1. Технологічні аспекти процесу адсорбції	188
2.9.1.1. Характеристика процесу адсорбції	188
2.9.1.2. Процес десорбції	191
2.9.2. Промислові адсорбенти і іоніти	193
2.9.3. Конструкції, принцип дії і розрахунок адсорберів	199
2.9.3.1. Вугільний адсорбер з нерухомим шаром адсорбента	199
2.9.3.2. Розрахунок вугільного адсорбера	201
2.9.3.3. Адсорбер з рухомим шаром адсорбента	202
2.9.3.4. Адсорбери з псевдозрідженим шаром	203
2.9.5. Теоретичні основи розрахунку адсорбера	205
2.10. Конструкції дифузійних апаратів та розрахунок параметрів екстракторів	207
2.10.1. Сутність і область застосування процесу	207
2.10.1.1. Загальна характеристика процесу екстрагування	207
2.10.1.2. Технологічні процеси з застосуванням екстракції	208
2.10.1.3. Методи екстракційного поділу та стадії процесу	210
2.10.2. Теоретичні основи процесу екстрагування	214
2.10.2.1. Основний закон молекулярної дифузії	214
2.10.2.2. Визначення параметрів екстракторів періодичної дії	215
2.10.2.3. Визначення параметрів екстракторів безперервної дії	217
2.10.3. Конструкції та принцип дії екстракторів	220

2.10.3.1. Класифікація екстракторів	220
2.10.3.2. Колонні вертикальні дифузійні апарати	222
2.10.3.3. Ротаційні дифузійні апарати	224
2.10.3.4. Шнекові дифузійні апарати	226
2.10.3.5. Вимоги до екстракційного обладнання	230
2.10.4. Елементи теорії і розрахунок шнекових екстракторів	231
2.11. Машино – апаратне оснащення процесу виробництва цукру методом кристалізації	237
2.11.1. Основи виробництва цукру – піску	237
2.11.1.1. Підготовка сировини до виробництва	237
2.11.1.2. Переробка бурякової стружки екстракцією	241
2.11.2. Характеристика процесу кристалізації	247
2.11.2.1. Застосування кристалізації в харчовій технології	247
2.11.2.2. Характеристика кристалів	249
2.11.3. Будова і принцип дії кристалізаторів	252
2.11.3.1. Основи теорії розрахунку кристалізаторів	252
2.11.3.2. Класифікація і принцип дії кристалізаторів	255
2.11.4. Виробництво цукру – рафінаду	259
2.12. Конструкції машин для пророщування солоду і розрахунок барабанних солодовень	272
2.12.1. Основи технологічного процесу вирощування солоду	272
2.12.1.1. Стадії технологічного процесу вирощування солоду	272
2.12.1.2. Машини та апарати лінії переробки солоду	272
2.12.2. Стаціонарні пристрої для пророщування ячменю	274
2.12.3. Конструкції механічних солодовень барабанного типу з плоским ситом	290
2.12.3.1. Будова та принцип дії барабанної солодовні з плоским ситом	290
2.12.3.2. Розрахунок основних параметрів камери барабану	292
2.12.4. Конструкції і розрахунок солодовень барабанного типу з сітчастими трубами	295
2.12.4.1. Характеристика, та принцип дії барабанної солодовні	295
2.12.4.2. Розрахунок барабанної солодовні з сітчастими трубами	297
Список літератури	302

ПЕРЕДМОВА

Суттєва роль у вирішенні проблеми забезпечення населення повноцінними продуктами харчування належить галузі з переробки сільськогосподарської продукції. Збільшення об'ємів виробництва харчових продуктів повинно супроводжуватись підвищенням їх якості та розширенням асортименту.

Проблема зберігання та переробки сільськогосподарських продуктів однаково актуальна і для великих і для малих підприємств різних форм власності. В зв'язку з цим виникає реальна потреба в підготовці спеціалістів саме такого профілю.

Випуск високоякісної харчової продукції можливий тільки за умов використання сучасних видів технологічного обладнання. Досягнення високих технічних показників у його роботі, добре знання тепло-масообмінних процесів, які відбуваються на різних стадіях виробництва, будови технологічного обладнання та прийомів раціональної його експлуатації. Це полегшує оцінку досконалості обладнання, сприяє підвищенню його надійності та довговічності, забезпечує правильний вибір потужності та режиму роботи.

Велике значення в сучасний момент є розуміння екологічної ситуації та її драматичних проблем, яке створює стурбованість, тривогу, бажання активно брати участь в її виправленні. Оволодівши теоретичними основами та методами розрахунку машин або апаратів, фахівець може розрахувати і проектувати апарати, які дозволяють проводити екологічно чисті технології.

"Розрахунки і конструювання машин і апаратів" – одна з основних профілюючих дисциплін, які формують професійний рівень майбутнього фахівця.

Для ефективного засвоєння матеріалу майже в усіх розділах наведено приклади розрахунків. Оскільки українська технічна література не має систематизованих підручників, в яких всебічно були б освітлені питання будови і розрахунку обладнання харчових виробництв, цей підручник має на меті частково заповнити названу прогалину.

РОЗДІЛ 1. МАШИНИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПІЛЬНИХ ТЕПЛО– І МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

1.1. ОБЛАДНАННЯ ТА МАШИНИ ДЛЯ СУШІННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ І СИРОВИНИ

1.1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕСУ СУШІННЯ.

Сушіння – це процес термічної обробки матеріалу з метою зниження його вологості, в результаті чого покращується якість продукції, запобігається її псуванню і злежуванню, зніжується вага та покращуються умови транспортування і зберігання.

Під час консервування сушінням внаслідок випаровування з продукту видаляється частина води. Якщо овочі, м'ясо, рибу висушити до вмісту в них води 12...14%, а плоди – до 15...25%, то в них припиняється життєдіяльність мікроорганізмів і тим самим створюються умови для тривалого зберігання продуктів. У деяких випадках харчові продукти сушать для поліпшення умов їх переробки (наприклад, сушіння солоду і рибних відходів перед їх подрібненням).

Залежно від властивостей висушуваних продуктів та умов технологічного процесу застосовують різні способи сушіння, що забезпечують високу якість готового продукту, збереження його харчової цінності і раціональне ведення процесу. На видалення 1 кг води під час сушіння витрачається велика кількість теплової або електричної енергії, тому там, де це можливо, воду видаляють до сушіння пресуванням, випаровуванням, центрифугуванням або фільтруванням.

У консервному й овочесушильному виробництві переважає конвективний спосіб сушіння, за якого повітря, температура якого вища за температуру продукту, стикається з продуктом, віддає йому частину теплоти і вбирає воду з нього. Застосовують також інші способи сушіння: контактний, коли тепло передається висушуваному продукту через контактну

з ним поверхню нагрівання; радіаційний, коли тепло передається тепловими (інфрачервоними) променями; сублимацією у глибокому вакуумі; струмами високої частоти.

Конструкції сушильних апаратів залежно від масштабів виробництва і властивостей матеріалу, сушіння в яких проводиться під атмосферним тиском або під вакуумом, при цьому матеріал може знаходитись в стані спокою, переміщатися або перемішуватися. Процес сушіння проводиться періодично або безперервно при різних способах передачі теплоти. Найбільш розповсюджений у харчовій промисловості кондуктивний та конвективний способи сушіння.

У кондукційних сушарках теплота для висушування матеріалу передається шляхом контакту його з нагрітою поверхнею, а в конвективних – теплота передається безпосередньо від теплоносія до матеріалу. При цьому видаляється волога, зв'язана з матеріалом, за рахунок механічних і фізико – хімічних сил. Хімічно зв'язана волога не видаляється у зв'язку з руйнуванням матеріалу.

Процес сушіння, з одного боку, є дифузійним, тому що переміщення вологи із внутрішніх шарів до поверхні матеріалу проходить за рахунок дифузії, а з другого, – тепловим, в зв'язку з тим, що випарування вологи з поверхні матеріалу проходить при підводі теплоти. Для сушіння та охолодження продукту застосовується атмосферне повітря, а також топковими газами або відхідними газами з котельних установок.

1.1.2. КЛАСИФІКАЦІЯ СУШИЛЬНИХ МАШИН І АПАРАТІВ

В залежності від способу сушіння сушарки можна розділити на декілька груп. Найчисленніша група представлена конвективними сушарками, в яких теплота від сушильного агента переноситься до матеріалу конвекцією. Другу, менш численну групу складають кондуктивні сушарки, в яких матеріал нагрівається при безпосередньому контакті з поверхнею нагріву. Третю

групу сушарок складають пристрої, в яких процес видалення вологи здійснюється в глибокому вакуумі при низьких температурах. Ці сушарки називають сублимаційними, тому що пароутворення в них відбувається минаючи рідкий стан. Четверту групу складають спеціальні сушарки, в яких використовують різні електрофізичні способи підведення енергії, наприклад за допомогою струмів високої частоти або інфрачервоних променів.

Сушарки, які застосовують в харчовій промисловості, відрізняються різноманітністю конструкцій типів сушарок, які класифікуються за своїми конструктивними і технологічними признаками:

- * *за величиною тиску в робочому просторі* – на атмосферні, вакуумні, під надмірному тиску;

- * *за режимом роботи* – на періодичної або безперервної дії;

- * *за видом теплоносія* – на повітряні, на димових або інертних газах, на насиченому або перегрітому парі, на рідких теплоносіях;

- * *за напрямком руху теплоносія щодо матеріалу* – на прямоточні, протитечійні, з перехресним струмом, реверсивні;

- * *за характером циркуляції теплоносія* – з природною або примусовою циркуляцією;

- * *за способом нагрівання теплоносія* – з паровим або повітряним підігрівачами, топковими пристроями, з електронагрівачами, комбіновані;

- * *за стислості використання теплоносія* – прямоточні або рециркуляційні;

- * *за способом підведення теплоти до матеріалу* – конвективні, контактні, з променистим нагріванням (радіаційні), з нагріванням струмами високої частоти; з акустичним або ультразвуковим нагріванням, сублимаційні, комбіновані;

- * *за видом висушеного матеріалу* – для крупнодисперсних, тонкодисперсних, пилоподібних, стрічкових, пастоподібних матеріалів, рідких розчинів або суспензій;

- * *за гідродинамічним режиму* – з щільним нерухомим шаром, переміщуваним шаром, зваженим шаром, (псевдозріджений шар,

фонтануючий шар, пневмотранспорт, закручені потоки), з розпиленням в потоці теплоносія;

* *за конструкцією сушарки* – на шахтні, стрічкові, камерні, барабанні, тунельні, вальцьові, вібросушарки.

1.1.3. КОНСТРУКЦІЇ ТА РОЗРАХУНОК СУШИЛЬНИХ АПАРАТІВ.

1.1.3.1. Конвективне сушіння матеріалів

Шахтні сушарки. Шахтні сушарки належать до установок безперервної дії і використовують в харчовій промисловості для сушіння сипучих матеріалів: цукру – піску, зерна, овочевої стружки та жому. Теплоносій і вологий матеріал в цих сушарках рухаються у протилежних напрямках.

Шахтна сушарка є економічним апаратом. Втрата пари на 1 кг випаровування вологи складає в ній 1,8...2,0 кг. Температура повітря, що поступає в сушарку, 75...80°C. Однак сушарка має ряд недоліків: зависання продукту в сушильній шахті внаслідок утворення грудок і налипання матеріалу на жалюзі, що вимагає періодичного очищення таких ділянок. Через це неможливо укласти сушарку в спеціальний корпус і здійснити організоване видалення з неї вологого повітря.

Крім того, тривалість сушіння продукту (варених круп) у цій сушарці в 3...4 рази більше, ніж в стрічкових конвеєрних сушарках. Вище і трудомісткість її обслуговування.

Конструктивна схема шахтної сушарки подана на рис. 1.1.1.

Вологий матеріал подається живильником 1 в сушильну камеру 2, в якій закріплені перфоровані перегородки 3, що мають отвори 4 в центральній частині. На вертикальному валу сушарки встановлені конуси 5 зі скребками 6, якими висушуваний матеріал підгрібається до центрального отвору перфорованих перегородок. Висушений матеріал відбирається в нижній частині сушарки, а відпрацьований теплоносій відсмоктується з верхньої

частини вентилятором 7. Сушарки цього типу працюють на топкових газах або на гарячому повітрі.

Для сушіння варених круп і сухого картопляного пюре використовують шахтні сушарки з пластинами. Каркас сушарки утворює камеру, в якій закріплені двадцять полиць. Полку являє собою шістнадцять пластин, кожна з яких з'єднана загальною тягою. За допомогою анкерів полиці повертаються на кут до 90°.

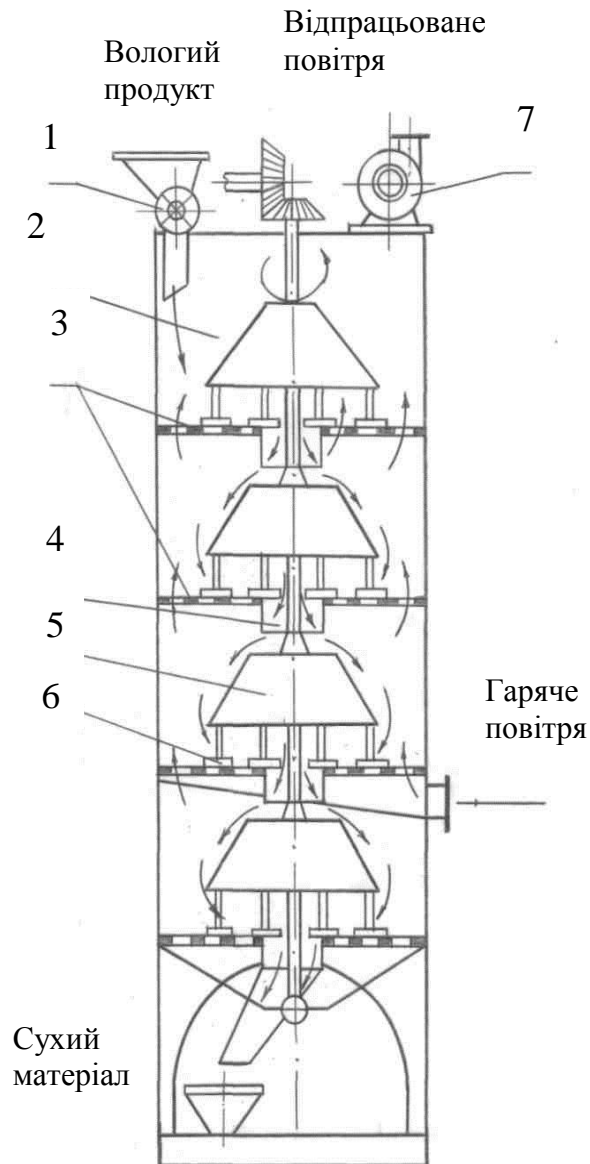


Рис.1.1.1. Конструктивна схема шахтної сушарки.

1 – живильник; 2 – сушильна камера; 3 – перфоровані перегородки; 4 – отвори; 5 – конуси зі скребками; 6 – скребки; 7 – вентилятор.

Т р у б а – с у ш а р к а . У трубних сушарках матеріали сушать у процесі їхнього транспортування газоподібним теплоносієм. Сушарки цього

типу використовують для сушіння дисперсних матеріалів. Найчастіше сушарка являє собою вертикально розташовану трубу, де в режимі, близькому до режиму ідеального витиснення, газ весь переміщається звичайно знизу в гору. Час перебування матеріалу в зоні сушіння складає декілька секунд. Швидкість газу в трубі сушарки вибирають у декілька разів вищу за швидкість витання часток найбільше значних фракцій сушильного матеріалу. Довжина труби в зоні сушіння досягає 20 м, а швидкість потоку нагрітого повітря складає 10...30 м/с.

Труба – сушарка складається з вузлів поданих на рис.1.1.2. Матеріал шнековим живильником 2 подають у трубу – сушарку 3, де він захоплюється потоком повітря, що нагнітається вентилятором 10 і нагрівається в топці 9.

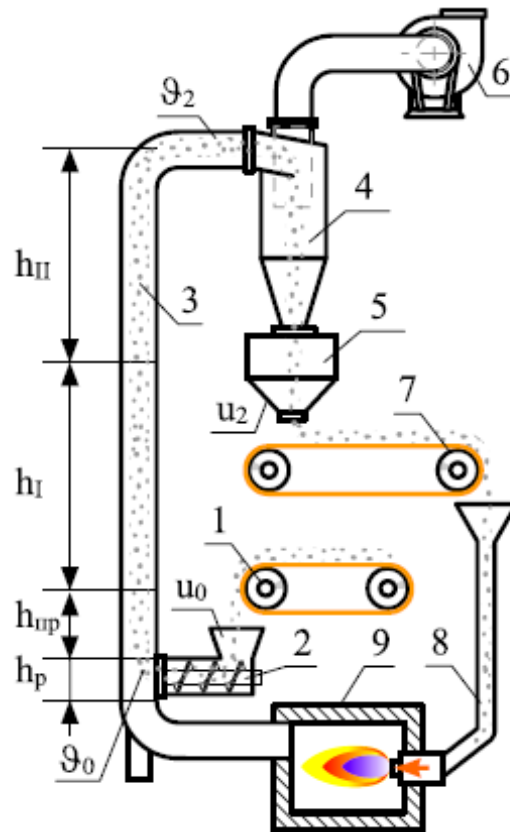


Рис.1.1.2. Труба – сушарка

1 – транспортер подачі вологого матеріалу; 2 – шнековий живильник; 3 – труба – сушарка; 4 – циклон; 5 – бункер для сухого матеріалу; 6 – димосос; 7 – транспортер для сухого матеріалу; 8 – прилад паливоподачі; h_{III}, h_I, h_2 – дільниці прогрівання першого і другого періодів сушіння; t_0, u_0 і t_2, u_2 – початкові і кінцеві температура і вологовміст матеріалу.

Повітря виносить висушений матеріал у циклон 4 для попереднього відділення матеріалу від відпрацьованого повітря і потім матеріал падає в бункер для сухого матеріалу 5 і далі транспортером 7 подається на склад.

Різновидом пневматичних сушарок є аерофонтанні сушарки. У цих сушарок сушильний матеріал витає в сушильній камері у потоці сушильного агента. Частки з низькою швидкістю витання (висохлі) безупинно виносяться з камери і відокремлюються від газу в циклоні.

Розрахунок аеродинаміки труби–сушарки.

В основі розрахунку сушильних установок лежить визначення швидкості витання частинок матеріалу $W_{\text{вит}}$. Як вже відомо, на одиночну тверду частинку, що знаходиться в направленому вгору потоці газу або рідини, діють: сила тяжіння G , підйомна (Архимедова) сила A і сила динамічного тиску потоку P .

Для кульової частинки діаметром d_M

$$G = \frac{\pi \cdot d_M^3}{6} \cdot \rho_M \cdot g; \quad (1.1.1)$$

$$A = \frac{d_M^3}{6} \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot g; \quad (1.1.2)$$

$$P = \xi_{\text{вит}} \cdot \frac{\pi \cdot d_M^2}{4} \cdot \frac{W_{\text{вит}}^2 \cdot \rho_{\text{ср}}}{2}; \quad (1.1.3)$$

де $\rho_M, \rho_{\text{ср}}$ – щільності матеріала і середовища, кг/м³; $W_{\text{вит}}$ – швидкість потоку (швидкість витання), м/с ; $\xi_{\text{вит}}$ – безрозмірний коефіцієнт лобового опору частинки, що залежить від режиму течії середовища.

Якщо $G - A > P$, частинка буде опускатися вниз, якщо $G - A < P$, частинка буде уноситися потоком вгору. При $G - A = P$, коли всі сили, що діють на частинку, врівноважені, частинка буде перебувати в потоці в завислому стані, буде в ньому "витати". Швидкість середовища, при якій досягається такий завислий стан частинки, називається **швидкістю витання**.

На початку труби частинки матеріалу зі швидкістю, що дорівнює нулю, підхоплюються потоком газу і збільшують свою швидкість до швидкості усталеного руху. Ця ділянка називається розгінною ділянкою (h_p). В кінці розгінної ділянки частинки матеріалу набувають швидкість, яка визначається з умови рівності сили тяжіння і опору середовища:

$$\frac{\pi \cdot d_M^3}{6} \cdot (\rho_M - \rho_{cp}) \cdot g = \xi_{\text{вит}} \cdot \frac{\pi \cdot d_M^2}{4} \cdot \frac{W_{\text{вит}}^2 \cdot \rho_{cp}}{2}. \quad (1.1.4)$$

З рівняння (1.4) визначається швидкість витання $W_{\text{вит}}$ частинок матеріалу:

$$W_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_M - \rho_{cp}) \cdot d_M}{3 \cdot \rho_{cp} \cdot \xi_{\text{вит}}}}. \quad (1.1.5)$$

Тепловий *розрахунок труби сушарки*.

Витрата теплоти на сушіння матеріалу складається з витрат теплоти на прогрів вологого матеріалу, витрати теплоти в 1–му періоді сушіння і витрат теплоти у 2–му періоді сушіння:

$$Q_c = Q_{\text{пр}} + Q_1 + Q_2. \quad (1.1.6)$$

Витрата теплоти в період прогріву дорівнює:

$$Q_{\text{пр}} = G_{\text{сух}} \cdot (c_M + c_w \cdot u_0) \cdot (\vartheta_M - \vartheta_0). \quad (1.1.7)$$

Витрата теплоти в 1–му періоді сушіння визначається за формулою:

$$Q_1 = G_{\text{сух}} \cdot (u_0 - u_k) \cdot r_1. \quad (1.1.8)$$

Витрата теплоти в 2–му періоді сушіння:

$$Q_2 = G_{\text{сух}} \cdot [(c_M + c_w \cdot u_2) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_M) + (u_k - u_2) \cdot r_2], \quad (1.1.9)$$

де $G_{\text{сух}}$ – витрата матеріалу за абсолютно сухою масою; c_M, c_w, c_p – теплоємності абсолютно сухого матеріалу, води і пари; u_0, u_k, u_2 – вологовміст матеріалу початковий, критичний і кінцевий; $\vartheta_0, \vartheta_M, \vartheta_2$ – температури матеріалу початкова, в 1–му і 2–му періодах сушіння; r_1, r_2 – теплотопаротворення в 1–му і 2–му періодах сушіння.

Втрати теплоти в навколишнє середовище приймаємо рівними:

$$Q_{\text{окр}} = k \cdot F_{\text{тр}} \cdot \Delta t \approx 0,1 \cdot Q_c. \quad (1.1.10)$$

Масова витрата сушильного агента:

$$L_T = \frac{Q_c + Q_{\text{окр}}}{c_r \cdot (t_{r1} - t_{r2})}, \quad (1.1.11)$$

де c_r – середня теплоємність сушильного агента; t_{r1} і t_{r2} – температура сушильного агента на вході і виході з труби.

Кількість теплоти, що передається матеріалу в пневматичній трубі – сушарці розраховується за рівнянням теплообміну:

$$Q_T = \alpha \cdot F_M \cdot \Delta t = \alpha_V \cdot F_{\text{тр}} \cdot \Delta t = \alpha_h \cdot h_{\text{тр}} \cdot \Delta t. \quad (1.1.12)$$

У рівнянні теплообміну площа поверхні частинок матеріалу F_M замінюється на площу перерізу труби $F_{\text{тр}}$. При цьому вводиться поняття об'ємного коефіцієнта тепловіддачі α_V – кількість теплоти, що передається вологому матеріалу в 1 м^3 обсягу труби при різниці температур $1 \text{ }^\circ\text{C}$ за одиницю часу. Величина об'ємного коефіцієнта теплообміну знаходиться в межах від 100 до 1200 Вт/($\text{м}^3 \cdot \text{K}$).

Розрахунок геометричних параметрів труби – сушарки.

Переріз труб – сушарки та її діаметр розраховуються за витратою сушильного агента (1.11):

$$F_{\text{тр}} = \frac{L_T}{3600 \cdot \rho_{\text{ср}} \cdot W_T}, \quad (1.1.13)$$

$$D_{\text{ТР}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{тр}}}{\pi}}, \quad (1.1.14)$$

де $W_T = W_{\text{вит}} + (1 \div 2 \text{ м/с})$ – швидкість сушильного агента.

Поверхня теплообміну (поверхню кульових частинок матеріалу) розраховується за виразом:

$$F_M = \pi \cdot d_M^2 \cdot n = 6 \cdot G_{\text{сух}} / (d_M \cdot \rho_M), \quad (1.1.15)$$

де $n = G_{\text{сух}} / (V_M \cdot \rho_M) = 6G_{\text{сух}} / (\pi \cdot d_M^3 \cdot \rho_M)$ – число частинок, що знаходяться в трубі.

Висота труби–сушарки складається з ділянок, відповідних періодам сушіння:

$$H_{\text{тр}} = \frac{Q_c + Q_{\text{окр}}}{3,6 \cdot \alpha_v \cdot F_{\text{тр}} \cdot \Delta t}, \quad (1.1.16)$$

де $\alpha_v = \alpha \cdot f_{\text{уд}}$ – об'ємний коефіцієнт теплообміну; $f_{\text{уд}} = F_m/V_{\text{тр}}$ – питома поверхня теплообміну, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $V_{\text{тр}}$ – обсяг труби, зайнятої матеріалом, м^3 ; $\alpha = 2\lambda_r/d_m$ – коефіцієнт конвективного теплообміну для частинок, що витають в трубі.

Пневматичні сушильні установки є високоефективними апаратами для сушіння вологих дрібнозернистих матеріалів. Вони компактні і прості у використанні. Діаметр труби зазвичай не перевищує 1,5 м, а її висота 10...25 м. Швидкість газів в трубі становить 20 ... 30 м / с. Однак ступінь висушування матеріалу в пневмосушарках невелика внаслідок малого перебування матеріалу в сушильній трубі. З метою досягнення більш глибокого підсушування матеріалу застосовують двох– і триступінчаті сушильні установки, або використовують установки зі спіральними трубами, наприклад для сушіння висівок.

Сушарка з киплячим шаром. В останній період широке застосування в харчовій промисловості отримало сушіння продуктів в киплячому (псевдозрідженому) та віброкиплячому шарі. Переваги цього способу сушіння полягає у простій конструкції апаратів, високій продуктивності їх і відносно короткому терміні сушіння.

Фізична суть способу сушіння продуктів у киплячому шарі полягає в тому, що коли через шар зернистого матеріалу, який знаходиться на решітці, пропускати з певною швидкістю повітря, то шар спочатку розпушується, а потім переходить в стан, що нагадує киплячу рідину, тобто в стан псевдозрідження. У цьому стані шар інтенсивно перемішується, завдяки чому всі частинки матеріалу омиваються теплоносієм. Внаслідок інтенсивного перемішування і контакту окремих частинок вирівнюється температура в усьому об'ємі, що особливо важливо при висушуванні більшості харчових продуктів.

Конструктивна схема сушили з киплячим шаром для сипучих харчових продуктів подана на рис. 1.1.3.

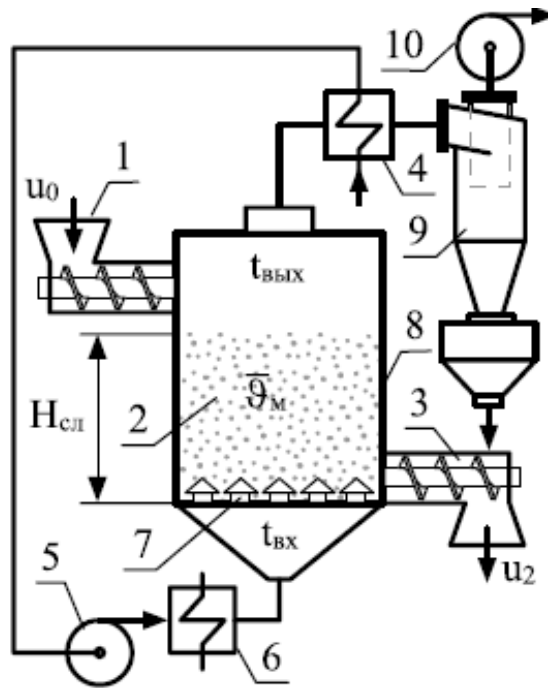


Рис.1.1.3. Сушильна установка з киплячим шаром

1 – шнековий живильник; 2 – киплячий шар; 3 – розвантажувальний пристрій для висушеного матеріалу; 4 – теплоуловлювач; 5 – повітряний нагнітач; 6 – калорифер; 7 – газорозподільна решітка; 8 – сушильна камера; 9 – циклон; 10 – вентилятор; u_0 і u_2 – початковий та кінцевий вологовміст матеріалу.

Сушильний апарат виконаний у вигляді прямокутного корпусу з сушильною камерою 8, в якій розташована газорозподільна решітка 7 для підтримування шару матеріалу і рівномірного розподілу теплоносія. У верхній частині апарату розміщений теплоуловлювач для регенерації теплоти відпрацьованих газів. Нагрівання повітря проводиться в калорифері 6, а подача вологого матеріалу відбувається за допомогою шнекового живильника 1. Розвантаження висушеного матеріалу відбувається за допомогою шнекового розвантажувача 3.

Вологий продукт 2 подається живильником 1 в сушильну камеру 8 і рас поділяється на підтримуючій решітці 7. Одночасно під розподільну решітку подається теплоносій, потік якого пронизує шар матеріалу, утворюючи псевдозріджений стан його. При цьому відбувається інтенсивне перемішування частинок продукту і швидке висушування їх.

Відпрацьований теплоносій за допомогою вентилятора 10 направляється в циклон для очищення і викидається в атмосферу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В.С. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко. – Мелітополь: видавничо – поліграфічний центр «Lux» 2021. – 329 с.
2. Бойко В.С. Процеси і апарати харчових виробництв. Механічні процеси: Підручник / В.С. Бойко, Н.П. К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, Н.П. Загларко, І.О. Мікульонок, В.Г. Циб. – Мелітополь: Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2018 – 273 с.
3. Бойко В.С. Процеси і апарати харчових виробництв. Гідромеханічні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г.Тарасенко,..... Мелітополь: Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарни, 2018 – 280 с.
4. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв: Підручник / К.О. Самойчук, В.С. Бойко, В.О. Олексієнко, С.В. Петриченко, В.Г. Тарасенко, Н.О. Паляничка, В.О. Верхоланцева, О.О. Ковальов, Н.О. Задосна; за ред. Самойчука К.О. – К: Проф. Книга, 2020. – 428 с.
5. Осокіна Н.М. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва: Підручник / Н.М. Осокіна, Г.С. Гайдай. – Умань: Уманське видавничо – поліграфічне підприємство, 2005. – 614 с.
6. Кулинченко В.Р., Мирончук В.Г. Промышленная кристаллизация сахаристых веществ: Монография. – К: НУПТ, 2012. – 421 с.
7. Процес сушіння продуктів сільськогосподарського виробництва: В.С.Бойко, Ф.Ю. Ялпачик. Методичні рекомендації для курсової роботи з дисципліни «РКМА» , Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – 76 с.
8. Розрахунок технологічного процесу сушіння та основних параметрів камерної сушарки: В.С. Бойко, Ф.Ю. Ялпачик. Методичні рекомендації для курсової роботи з дисципліни «Розрахунки і конструювання машин і апаратів» , Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – 28 с.

9. Розрахунки конвективних сушарок графоаналітичним методом:к В.С. Бойко, С.Ф. Буденко. Методичні вказівки з дисципліни «РКМА», Мелітополь: ТДАТУ. 2019. – 23 с.

10. Конструкції та розрахунки параметрів камерної сушарки: В.С. Бойко, С.Ф. Буденко. Методичні вказівки з дисципліни «РКМА», Мелітополь: ТДАТУ. 2019. – 23 с.

11. Конструкції і розрахунки параметрів абсорберів: В.С. Бойко, С.Ф. Буденко. Методичні вказівки з дисципліни «РКМА», Мелітополь: ТДАТУ. 2019. – 26 с.

12. Розрахунок параметрів дифузійного апарата: В.С. Бойко, С.Ф. Буденко, В.Г. Тарасенко. Методичні вказівки для виконання практичних занять з дисципліни «РКМА», Мелітополь: ТДАТУ. 2019. – 21 с.

13. Розрахунок преса для цукру рафінаду: В.С. Бойко, С.Ф. Буденко. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни «РКМА», Мелітополь: ТДАТУ. 2019. – 15 с.

14. Розрахунок параметрів брагоректифікаційного апарата: В.С. Бойко, С.Ф. Буденко. Методичні вказівки до виконання практичних занять з дисципліни «РКМА», Мелітополь: ТДАТУ. 2019. – 19 с.

15. Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник. 3–е изд., испр. и доп. М. : Пищевая промышленность, 1976. 663 с.

16. Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник. 3–е изд., испр. и доп. М. : Агропромиздат, 1985. 503 с.

17. Кавецкий Г. Д., Васильев Б. В. Процессы и аппараты пищевой технологи. 2–е изд., перераб. и доп. М. : Колос, 1999. 551 с.

18. Горбатюк В. И. Процессы и аппараты пищевых производств : ученик. М. : Колос, 1999. 335 с.

19. Мельников С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм : учебное пособие. Л. : Колос, 1978. 560 с.

20. Фёдоров Н. Е. Процессы и аппараты мясной промышленности. М. Пищевая промышленность, 1969. 550 с.
21. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками : пер. с польського. Под ред. И. А. Щупляка. М. : Химия, 1975. 384 с.
22. Шалугін В. С., Шмандій В. М. Процеси та апарати промислових технологій : навч. посібник. К. : Центр учбової літератури, 2008. 392 с.
23. Процеси та апарати харчових виробництв : підручник / Поперечний А. М., Черевко О. І., Гаркуша В. Б., Кирпиченко Н. В. ; за ред. А. М. Поперечного. К. : Центр учбової літератури, 2007. 304 с.
24. Механічні процеси і обладнання переробного та харчового виробництва : навч. посіб. / П. С. Берник та ін. Львів : Львівська політехніка, 2004. 336 с.
25. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / В.Г. Мирончук та ін. Вінниця : Нова книга, 2004. 288 с.
26. Остриков А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / А .Н. Остриков и др. Кн. 1. СПб. : Гиорд, 2007. 704 с.
27. Остриков А. Н., Парфенопуло М. Г., Шевцов А. А. Практикум по курсу "Технологическое оборудование" : учеб. пособие для вузов. Воронеж : Воронеж. гос. техн. акад., 1999. 424 с.
28. Малежик І. Ф. Процеси і апарати харчових виробництв : лабораторний практикум. За ред. І. Ф. Малежика. К. : НУХТ, 2006. 224 с.
29. Лабораторний практикум з дисципліни „Процеси і апарати“: Навчальний посібник. / В.Ф. Ялпачик та ін. Мелітополь : Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. 275 с.
30. Процеси і апарати харчових виробництв : лабораторний практикум : навч. посібник. / О. І. Черевко та ін. ; Харків : Світ Книг, 2013. 168 с.
31. Гапонов К. П. Процессы и аппараты микробиологических производств М.: Легкая и пищевая пром–ть, 1981. 240 с.

32. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам пищевых производств / А. С. Гинзбург и др. 3-е изд. перераб. и доп. М. : Агропромиздат, 1990. 256 с.

33. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / І.С. Гулий та ін. / Під ред. І.С. Гулого. К. : 2001. 576с

34. Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. Кн. 1 : Учеб. для вузов. / Антипов С.Т. и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. М. : Высшая школа, 2001. 703 с.

35. Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. Кн. 2 : Учеб. для вузов. / Антипов С.Т. и др.; Под ред. акад. РАСХН В.А. Панфилова. М. : Высшая школа, 2001. 680 с.

36. Лонцин М., Мерсон Р. Основные процессы пищевых производств. Под ред. И.А. Рогова, С.С. Панченко. М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1983. 384 с.

37. Остриков А.Н., Абрамов О.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств. Учебник для вузов, СПб.; ГИОРД, 2003. 352с.

38. Гребенюк С.М., Михеева Н.С. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам М. : Агропромиздат, 1987. 304 с.

39. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии : Учебник для вузов. Изд. 2-е. В 2-х кн. Часть 2 Массообменные процессы и аппараты. М. : Химия, 1995. 368 с.

40. Даурский А.Н., Мачихин Ю.А., Хамитов Р.И. Обработка пищевых продуктов резанием. Под ред. Ю.А. Мачихина. М. : Пищевая промышленность, 1994. 216 с.

41. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2007. 760 с.

Навчальне видання

Бойко Валентин Семенович
Самойчук Кирило Олегович
Тарасенко Віра Григорівна
Ломейко Олександр Петрович
Олексієнко Вадим Олександрович
Петриченко Сергій Володимирович
Пупинін Андрій Андрійович
Гавдида Ганна Іванівна

**КОНСТРУКЦІЇ І РОЗРАХУНОК МАШИН ТА АПАРАТІВ
ПЕРЕРОБНИХ ВИРОБНИЦТВ**

Підручник для студентів
закладів вищої освіти

Підписано до друку **28.05.2021.**
Формат 60x84 / 16. Гарн. Таймс. Папір офсетний.
Умов. друк. арк. 12,83. **Зам. № 124**
Наклад 100 прим.