

УДК 664.021.3/4.64(035)
ББК 36.81-5:41.47
В19

Рецензенты: *С. Т. Антипов*, доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов пищевых производств, проректор по научной и инновационной деятельности (Воронежский государственный университет инженерных технологий);
И. А. Макеева, доктор технических наук, профессор

Васильев В. Н.
В19 Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса : учебник для вузов / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. — СПб.: ГИОРД, 2013. — 224 с. : ил.
ISBN 978-5-98879-175-1

В учебнике представлены основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Даны главы, включающие гигростатику и формы связи влаги с материалом. Рассмотрены также статика, кинетика процесса сушки в виде аналитических решений, дифференциальных уравнений массопереноса, а также эмпирических уравнений, полученных с использованием методов теории и подобия. Приведены конкретные примеры расчетов процессов конвективной и кондуктивной сушки пищевых продуктов в агрегатах периодического и непрерывного действия. Дан расчет вспомогательного оборудования.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров 260100 «Продукты питания из растительного сырья» и 260200 «Продукты питания животного происхождения».

УДК 664.021.3/4.64(035)
ББК 36.81-5:41.47

ISBN 978-5-98879-175-1

© ООО «Издательство „ГИОРД“», 2013

Оглавление

Введение	9
Глава 1. Классификация методов обезвоживания, тепловой сушки и сушильных установок	12
1.1. Принципы и методы обезвоживания	12
1.2. Классификация методов тепловой сушки	15
1.3. Конвективная сушка	15
1.4. Классификация конструкций сушильных установок	15
Глава 2. Влажный воздух как сушильный агент. Основы гигростатики	23
2.1. Основные параметры влажного воздуха	24
2.2. Температура мокрого термометра	28
2.3. Определение влажности воздуха	28
2.4. <i>I-d</i> -диаграмма влажного воздуха	31
2.5. Основные принципы построения <i>I-d</i> -диаграммы	31
2.6. Изменение состояния влажного воздуха в <i>I-d</i> -диаграмме и построение линий $t_m = \text{const}$	35
Глава 3. Влага в материале	36
3.1. Влажный материал	36
3.2. Физико-химические характеристики воды. Классификация форм связи влаги в материалах	37
3.3. Энергия связи влаги с материалом	41
3.4. Увязка классификации форм связи влаги с изменением свойств влажных материалов при их обработке	43
Глава 4. Взаимодействие влажного материала и воздуха до гигротермического равновесного состояния. Основы статики сушки	46
4.1. Изотермы сорбции и десорбции	46
4.2. Классификация влаги в материале в увязке с процессом ее удаления.	48

Глава 5. Материальный и тепловой баланс процесса сушки	50
5.1. Материальный баланс сушильных установок	50
5.2. Тепловой баланс подогревателя воздуха	51
5.3. Тепловой баланс конвективной сушильной камеры	51
5.4. Аналитический расчет процесса сушки	54
5.5. Построение процесса в $I-d$ -диаграмме и методика графоаналитического расчета расхода воздуха и тепла	54
5.6. Методика аналитического расчета параметров воздуха в сушильной установке	57
5.7. Варианты сушильного процесса	59
5.7.1. Вариант с рециркуляцией отработавшего сушильного агента	60
5.7.2. Вариант с промежуточным подогревом сушильного агента	61
5.8. Определение энергетического коэффициента полезного действия сушильной установки	62
Глава 6. Кинетические закономерности процесса сушки	64
6.1. Экспериментальные закономерности процесса сушки	64
6.2. Кривые сушки	64
6.3. Кривые скорости сушки	65
6.4. Температурные кривые	66
6.5. О кинетике процесса сушки	69
6.6. Аппроксимационные формулы для времени сушки	74
6.7. Дифференциальное уравнение теплопереноса в процессах конвективной сушки	76
6.8. Дифференциальное уравнение переноса влаги	76
6.9. Период постоянной скорости сушки	77
6.10. Период убывающей скорости сушки	78
6.11. Кинетика сушки квазиодномерного тела	80
6.12. Кинетика сушки хлеба	84
6.13. Сублимационная сушка плодов и ягод	88
6.14. Усушка при холодильном хранении пищевых продуктов	91
6.15. Усушка при охлаждении и замораживании пищевых продуктов	93
6.16. Числа (критерии) подобия тепло- и массопереноса в процессах сушки	96

6.17. Кинетические закономерности процесса сушки дисперсных материалов в агрегатах непрерывного действия	97
6.18. Агрегаты с кипящим и фонтанирующим слоями	103
6.19. Щелевой агрегат	104
6.20. Барабанный агрегат	105
6.21. Массообмен при сушке пленки продукта на поверхности инертной частицы. Продолжительность процесса	109
6.22. Удельное объемное заполнение агрегата продуктом. Коэффициенты массообмена.	114
6.23. Сушка распылением.	118
6.24. Контактный способ	125
Глава 7. Время пребывания дисперсного материала в агрегатах непрерывного действия	129
7.1. Труба-сушилка	131
7.2. Горизонтальный барабанный агрегат со шнековой насадкой.	136
7.3. Агрегат со щелевым подводом теплоносителя	138
Глава 8. Конструкции сушильных камер	141
8.1. Камеры с кипящим слоем.	141
8.2. Распылительная сушилка для жидких и пастообразных материалов.	156
8.3. Распылительная сушилка А1-ОРЧ	159
8.4. Распылительная сушилка ЦТР-500 фирмы «Нема»	161
8.5. Распылительная сушильная установка RS-1000	163
8.6. Вращающиеся барабанные агрегаты.	165
8.7. Сублимационная сушилка	171
Глава 9. Методика инженерного расчета сушильных агрегатов для сушки сыпучих пищевых продуктов и белоксодержащих паст, суспензий, эмульсий.	178
9.1. Поисковая работа перед проектированием	178
9.2. Потери напора в трубопроводах.	181
9.3. Охрана окружающей среды и способы очистки отработанного теплоносителя.	187
9.4. Общие вопросы гидродинамики омывания.	190
9.4.1. Скорости взвешивания и уноса частиц	190

9.4.2. Порозность и высота кипящего слоя	191
9.5. Потери напора при движении теплоносителя через агрегат при конвективной сушке дисперсных пищевых продуктов	192
9.6. Методика инженерного расчета вихревого сушильного аппарата	193
9.7. Методика инженерного расчета барабанного агрегата для сушки семян подсолнечника	195
Глава 10. Расчет вспомогательного оборудования сушильных установок	201
10.1. Топка на природном газе	201
10.2. Расчет основных параметров топочных газов, выходящих из топки и поступающих в барабанный агрегат	202
10.3. Паровые калориферы	207
Приложения	209
Приложение 1. Зависимость между давлением пара и его температурой	209
Приложение 2. Определение относительной влажности воздуха по аспирационному психрометру. Разность показаний сухого и влажного термометров	211
Библиографический список	219