

В.Н. Васильев, В.Е. Куцакова, С.В. Фролов

ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ

ОСНОВЫ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области технологии продуктов питания и пищевой инженерии в качестве учебника для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров и магистров 260100 «Продукты питания из растительного сырья» и 260200 «Продукты питания животного происхождения»

Санкт-Петербург
ГИОРД
2013

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

Введение

Сушка широко применяется в промышленной переработке сельскохозяйственной продукции для лучшей сохранности сырья, а также при производстве пищевых продуктов как метод их консервирования. Объектами сушки могут быть разнообразные материалы на различных стадиях их переработки (сырье, полуфабрикаты, готовые изделия).

Сушка позволяет сократить потери ценных ингредиентов, а также эффективно реализовать побочные продукты пищевых производств, что в конечном итоге выражается в создании безотходных производств.

Создание высокоэффективной технологии сушки пищевых продуктов и соответствующего этой технологии аппаратного оформления процесса должно развиваться по двум основным направлениям. Первое связано с интенсификацией процесса в серийно выпускаемом оборудовании и модернизацией последнего. Второе — с созданием принципиально новой прогрессивной технологии и оборудования для ее обеспечения.

Наряду с изложенными положениями следует помнить о значительной энергоемкости процессов сушки. Большое значение имеет реализация этих процессов при высокой интенсивности сушильного процесса, обеспечивающего минимальные энергетические затраты.

Пищевые материалы сушатся с различной целью:

- 1) для уменьшения массы, что удешевляет их транспортирование;
- 2) повышения стойкости при хранении;
- 3) как один из методов консервирования пищевых продуктов, таких как биопрепараты и пищевые продукты.

Сушка — сложный технологический процесс, который часто является решающим этапом производства. Принципы обезвоживания и методы сушки весьма разнообразны. Повышение производительности сушильных установок может быть достигнуто как экстенсивными методами — путем увеличения габаритов сушильной камеры, уменьшения простоев и т. д., так и более эффективными интенсивными методами — путем повышения скорости сушки и соответствующего сокращения продолжительности процессов. В свою очередь, это может быть достигнуто как за счет увеличения кинетических коэффициентов, таких как диффузионный и молярный перенос влаги, так и за счет повышения движущих сил процесса — градиентов влагосодержания, температуры и давления.

Повышение движущих сил процесса имеет определенные технологические пределы, связанные с термолабильностью биологических объектов, в том числе и пищевых продуктов. Увеличение кинетических коэффициентов возможно введением, например, предварительного нагрева материала перед сушкой, что способствует резкому повышению коэффициента диффузии влаги внутри продукта.

Теория сушки рассматривает общие аналитические и экспериментальные закономерности процесса в их взаимосвязи, вскрывает механизм и движущие силы протекания процессов при различных методах энергоподвода. Технология сушки изучает свойства материалов как объектов сушки, что является основой рационального выбора процесса и оптимального режима его проведения. Применение отдельных принципов обезвоживания и методов сушки обусловлено энергией связи влаги с материалом. В случае когда агрегатное состояние влаги в продукте не изменяется, то удаляется свободная или слабо связанная с материалом влага. При изменении агрегатного состояния влаги скорость сушки и расположение зоны испарения в значительной степени зависят от прочности связи влаги с материалом. То есть энергия затрачивается как на преодоление силы этой связи, так и на теплоту парообразования. Следует помнить, что большинство пищевых продуктов являются коллоидными, а по структуре — капиллярно пористыми материалами, в которых влага прочно связана с твердым скелетом. Кроме того, эти продукты поступают на сушку с высокой влажностью, причем значительная часть влаги должна быть удалена в процессе сушки. Так, например, влажность уменьшается: при сушке овощей с 90 до 6–12 %; при сушке белоксодержащих продуктов (молока, мясных гидролизатов, бульонов и т. д.) от 80 до 2–6 %.

Примером интенсификации процессов в серийно выпускаемом оборудовании и модернизации последнего может служить анализ процессов тепло- и массообмена в барабанном агрегате на примере легких полидисперсных материалов, таких как семена подсолнечника. Можно показать, что используемые технологические режимы применительно к подобным продуктам не оптимальны, что приводит к низкому термическому коэффициенту полезного действия подобных агрегатов. Незначительная модернизация может привести к существенному увеличению производительности, а следовательно, и термического КПД.

Второе направление связано с созданием принципиально нового оборудования, приводящего к максимально возможному массо- и теплообмену. Например, при сушке растворов, суспензий и паст в сравнительно недавно разработанных аппаратах вихревого слоя, аппаратах со встречно-закрученными струями и т. д.

Бакалавры, инженеры и магистры, работающие в области производства и консервирования биологических объектов и пищевых продуктов, в зависимости от профиля их практической деятельности должны владеть достаточно глубокими знаниями в области теории, технологии и техники сушки.

Для этого при построении учебника вначале формулируются общие положения по физико-химическим основам процесса сушки, относящиеся к влажному материалу и влажному газу. Рассматривается взаимодействие влажного материала и влажного газа (воздуха) до гигротермического состояния. Затем исследуется наиболее сложный вопрос, связанный с кинетикой процесса сушки, основами переноса энергии и влаги в процессе сушки, на чем базируются методы расчета продолжительности процесса. Представлены методики инженерного расчета ряда сушильных установок, а также вспомогательного оборудования, обеспечивающего теплоподвод в сушильную камеру.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ, ТЕПЛОВОЙ СУШКИ И СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

1.1. Принципы и методы обезвоживания

Принципы обезвоживания включают как механическое обезвоживание, так и тепловую сушку. Рассмотрим классификацию принципов и методов обезвоживания (табл. 1.1).

Наиболее широкое применение имеет тепловая сушка, при которой влага материала за счет сообщенной или генерируемой энергии переходит в парообразное состояние и в виде пара удаляется из материала в среду сушильной камеры. Тепловая сушка твердых материалов осуществляется в основном путем испарения, однако в некоторых случаях — при прогреве в электрическом поле высокой частоты, когда температура материала достигает точки кипения, — начинается выпаривание воды в массе материала. При этом не только кинетическая энергия отдельных молекул, но и средняя кинетическая энергия всех молекул влаги внутри тела достигает величины, обеспечивающей преодоление энергии связи внутри тела, а также сопротивление внешней среды, куда отводится образующийся пар. Из сушильной камеры пар удаляется в смеси с газом или в чистом виде отводится в конденсатор. Влагу материала можно также предварительно заморозить — превратить в лед, а затем за счет энергии, подводимой извне, будет осуществляться возгонка льда.

Сушка является типичным нестационарным необратимым процессом, при котором влагосодержание материала меняется как в объеме, так и во времени, а сам процесс будет стремиться к равновесию. Интенсивность сушки зависит от физико-химических свойств материала и движущей силы процесса.

Сушкой называется процесс удаления из материала любой жидкости, в результате чего в нем увеличивается относительное содержание сухой части. На практике при сушке влажных материалов, в том числе пищевых продуктов, удаляют главным образом воду, поэтому под сушкой понимают процесс обезвоживания материалов. Таким образом, хотя

Таблица 1.1

Классификация принципов и методов обезвоживания

Принцип обезвоживания	Методы обезвоживания	Сущность метода обезвоживания	Технические способы обезвоживания
Без изменения агрегатного состояния влаги	Механическое обезвоживание	Удаление жидкости с преодолением гидравлического сопротивления твердого скелета тела жидкой и твердой фазой	А. Прессование. Б. Центрифугирование и сепарирование. В. Фильтрация
	Контактный массообмен	Перемещение жидкости из тела с большим потенциалом переноса влаги в тело с меньшим потенциалом переноса	Контакт влажных материалов с гигроскопическими веществами, имеющими более низкий потенциал переноса влаги (например, контакт влажного материала с силикателем, контакт влажного и сухого зерна и т. п.)
С изменением агрегатного состояния влаги	Тепловое обезвоживание	Перевод жидкости в парообразное состояние и перенос пара в окружающую среду	А. Испарение — тепловая сушка твердых и жидких материалов. Б. Выпаривание жидкости в растворах и в твердых материалах (при прогреве в массе)
		Перевод пара в жидкое агрегатное состояние	Конденсация — осушение влажных газов при охлаждении их ниже точки росы
Комбинированное обезвоживание	Тепловое обезвоживание при резком изменении давления окружающей среды (со «сбросом» давлений)	Превращение жидкости в пар и перенос пара в окружающую среду, в которой создается повышенное давление. При последующем резком снижении давления в массе материала происходит весьма интенсивное парообразование за счет тепла, аккумулированного в материале, подводящего извне	Циклический нагрев влажного материала (например, теплоизоляторов) в термической камере при повышении давления за счет пара, выделяющегося из материала, чередующийся с выпуском пара из камеры, вызывающим резкое снижение давления. Аналогичный механизм обезвоживания имеет место при производстве «воздушных» зерен кукурузы и других злаков, которые за счет значительного внутреннего давления увеличиваются в объеме и разрываются (Московский пищекомбинат)