



А.А. ДОЛИНСКИЙ
К.Д. МАЛЕЦКАЯ

РАСПЫЛИТЕЛЬНАЯ
СУШКА

В ДВУХ ТОМАХ



**ТОМ
1**

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ.
МЕТОДЫ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ
И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

КИЕВ
АКАДЕМПЕРИОДИКА
2011

УДК 66.047

ББК 36.91

Д64

*Утверждено к печати ученым советом
Института технической теплофизики НАН Украины*

*Издание осуществлено
согласно государственному контракту
на выпуск научной печатной продукции*

Д64 Долинский А.А., Малецкая К.Д.
Распылительная сушка : В 2-х т. Т. 1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. / А.А. Долинский, К.Д. Малецкая. — Киев: Академперіодика, 2011. — 376 с.

ISBN 978-966-360-174-8

ISBN 978-966-360-175-5 Т. 1

Представлены результаты многолетних работ, проведенных в ИТТФ НАН Украины по экспериментальным и теоретическим исследованиям процессов тепломассопереноса при испарении и сушке различных жидкостных систем в диспергированном состоянии в высокотемпературном парогазовом потоке. Предложены эффективные схемы и новые конструкции распылительных аппаратов, методы управления процессами тепломассообмена в производстве порошковых продуктов.

Для научных и инженерно-технических специалистов по вопросам производства порошковых продуктов сушкой распылением.

УДК 66.047

ББК 36.91

ISBN 978-966-360-174-8

ISBN 978-966-360-175-5 (Т. 1)

© А.А. Долинский К.Д. Малецкая, 2011

© Академперіодика, оформление, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Значительные масштабы и объемы производства многочисленных продуктов в порошкообразной форме в различных отраслях промышленности (пищевой, химической, микробиологической, химико-фармацевтической, в изготовлении строительных материалов, удобрений, кормов и др.) определили широкое использование распылительного способа сушки. Эти установки имеют прежде всего такие преимущества, как возможность осуществления в одном аппарате одновременно процессов диспергирования жидкостных систем, испарения и сушки капель при значительно развитой поверхности взаимодействующих фаз: диспергированной жидкости и высокотемпературной парогазовой среды. При этом высокая дисперсность распыленной жидкости сокращает время сушки («мгновенная сушка»), что определяет возможность получения в целом ряде случаев конечного продукта с высокой растворимостью и сохранением ценных компонентов, в том числе и достаточно термочувствительных.

Кроме того, метод распылительной сушки позволяет в определенном диапазоне управлять дисперсионными и структурно-механическими характеристиками получаемых тонкодисперсных материалов. При распылительной сушке формирование структуры твердой фазы и стабилизация формы и размера частиц происходит в самой сушильной камере в процессе удаления влаги. Управление структурными характеристиками может осуществляться как изменением режимных параметров работы установки, так и определением рациональных параметров исходного жидкого продукта.

В Институте технической теплофизики НАН Украины на протяжении многих лет проводятся исследования, направленные на поиск путей интенсификации тепломассообмена в камерах распылительных установок и совершенствование теплотехнологических процессов. Большой комплекс работ, выполненных в Институте для различных отраслей промышленности, позволил осуществить производство новых ценных продуктов, получить многие из них в более удобной для дальнейшего использования форме, улучшить их качественные характеристики и увеличить сроки их хранения.

Проблемы интенсификации и оптимизации теплотехнологических процессов, совершенствования конструкций аппаратов и технологических схем, повышение качества продукции и снижение энергозатрат потребовали более глубокого изучения процессов тепломассопереноса при обезвоживании жидких систем в диспергированном состоянии.

В Институте технической теплофизики НАН Украины на основе комплекса аналитических и экспериментальных исследований разработаны основы теплофизических процессов тепловлагопереноса при обезвоживании жидкостных материалов в диспергированном состоянии в высокотемпературной парогазовой среде. Развита концепция и методологические принципы аналитического и экспериментального исследования процессов тепловлагопереноса в сложных взаимосвязанных аэродинамических и температурно-влажностных условиях в камерах распылительных сушилок и распылительных концентраторах. Разработаны новые методы управления кинетическими характеристиками, которые базируются на исследованиях, рассматривающих систему «капля (частица)—парогазовая среда» как элементную систему в сложной аэродинамической обстановке распылитель-

ных камер. Впервые установлено, что внутренние процессы переноса теплоты и влаги, протекающие в отдельной частице дисперсной системы, оказывают определяющее влияние на длительность обезвоживания и конечные физико-химические характеристики высушиваемого продукта. На основе результатов теоретического и экспериментального исследования разработаны модели процессов тепло-влажностного переноса при обезвоживании продуктов в диспергированном состоянии, в которых были рассмотрены внешние и внутренние особенности этих процессов в высокотемпературном газовом потоке, возможности учета кинетических закономерностей процесса обезвоживания единичной капли. Результаты этих исследований составляют научную основу для дальнейшего совершенствования процессов распылительного обезвоживания на основе установленных теплофизических особенностей. Обобщенные в томе I настоящей монографии многолетние исследования сотрудников отдела «Тепло-влажностный перенос в дисперсных системах», проведенные под руководством академика НАН Украины О.А. Кремнева и академика НАН Украины А.А. Долинского, представлены в виде отдельных частей.

Часть I «Теплофизические основы распылительной сушки» содержит результаты экспериментальных и аналитических исследований кинетики испарения и сушки многочисленных растворов, суспензий, дисперсий, различных по физико-химическим свойствам, на специально созданных экспериментальных стендах, моделирующих различные условия взаимодействия единичных капель с нагретой парогазовой средой. Эти данные позволили рассмотреть уточненные физические и математические модели процессов, имеющих место в камерах распылительных установок с высокотемпературным газовым теплоносителем. Часть II «Инновационная технология двухстадийного распылительного обезвоживания термолабильных растворов» включает комплекс экспериментальных исследований процессов испарения и сушки жидкостных материалов на системе «капля (частица)—парогазовая среда»; исследование процессов тепло-влажностного переноса при распылительном концентрировании и сушке на экспериментальных, опытно-промышленных и промышленных установках, которые стали научной основой разработки инновационного двухстадийного способа распылительного обезвоживания высоковлажных термочувствительных материалов различного назначения.

В том 2 монографии включены результаты экспериментальных исследований, направленных на создание новых эффективных технологий с использованием распылительного способа обезвоживания и получения порошкообразных форм различных продуктов на основе кинетических, структурно-механических характеристик этих продуктов, как объектов сушки в диспергированном состоянии в различных отраслях промышленности.

Том I подготовлен академиком А.А. Долинским и докт. техн. наук К.Д. Малецкой. В этот том вошли результаты их собственных исследований, а также исследований сотрудников отдела «Тепло-массообмен в дисперсных средах»: докт. техн. наук Г.К. Иваницкого, канд. техн. наук Ю.И. Воловика, канд. техн. наук В.Н. Мудрикова, канд. техн. наук Г.П. Приходченка, канд. техн. наук В.В. Шморгуна, канд. техн. наук Т.С. Рыжковой, научных сотрудников Л.М. Дамского, Г.Г. Мосейчука, А.Г. Заритовской, Е.А. Переяславцевой, Т.Я. Турчиной, которые принимали активное участие в выполнении этих исследований.

Большой вклад в проведении экспериментальных исследований, отработке тепло-технологических параметров на опытных и опытно-промышленных установках, в разработке конструкторской документации и совершенствовании нового распылительного оборудования внесли сотрудники ОКТБ Института: заведующие отделами — Л.М. Маслюгов, Ю.Д. Николаев, А.Т. Малушенко, А.П. Гартвиг, главные конструкторы проектов — П.И. Кузьменко, Г.Г. Мосейчук, В.В. Кузьменко, Н.А. Годадзе.

Авторы монографии выражают искреннюю благодарность научным сотрудникам отдела, принимавшим участие в технической подготовке рукописи — А.Г. Заритовской, Т.Я. Турчиной, Е.А. Переяславцевой, Н.Б. Сильягиной.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
-------------------	---

ЧАСТЬ 1

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СУШКИ

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ЖИДКОСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Основные принципы организации процесса обезвоживания в диспергированном состоянии	9
1.2. Конструктивные особенности распылительных сушильных установок	11
1.3. Теплотехнологические особенности процесса распылительной сушки. Характеристики порошкообразных материалов	20
1.4. Основные направления совершенствования установок для распылительного обезвоживания	25

ГЛАВА 2

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ И СУШКИ НА СИСТЕМЕ «ЕДИНИЧНАЯ КАПЛЯ – ПАРОГАЗОВАЯ СРЕДА»

2.1. Методология экспериментального исследования процессов тепловлагопереноса при испарении и сушке капель в нагретой газовой среде	32
2.2. Экспериментальные стенды для исследования теплофизических особенностей обезвоживания капель жидкостных материалов в нагретой парогазовой среде	34
2.3. Методика определения кинетических и тепломассообменных характеристик	43
2.4. Влияние режимных параметров и молекулярной природы растворенных веществ на кинетические характеристики	46
2.5. Классификация материалов как объектов сушки распылением на основе кинетических закономерностей	69

ГЛАВА 3

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ ИСПАРЕНИЯ И СУШКИ ЕДИНИЧНЫХ
КАПЕЛЬ В ПАРОГАЗОВОЙ СРЕДЕ**

3.1. Моделирование процесса испарения капель чистых жидкостей.	76
3.2. Моделирование процессов испарения и сушки капель растворов в нагретой воздушной среде.	83
3.3. Аналитическое рассмотрение процессов теплообмена при обезвоживании единичных капель в высокотемпературной газовой среде.	89
3.3.1. Внешняя задача. Температурное поле вокруг испаряющейся капли воды.	90
3.3.2. Внешняя задача. Концентрационное и температурное поля вокруг испаряющейся капли раствора.	94
3.3.3. Внутренняя задача. Концентрационное и температурное поля в капле раствора.	99
3.3.4. Моделирование процессов теплообмена при обезвоживании капель растворов в сушильной стадии.	105
3.4. Моделирование процесса сушки капель различных жидких продуктов в соответствии с их классификацией.	116
3.4.1. Модель процесса сушки капли раствора, покрытой тонкой коркой растворенного вещества.	116
3.4.2. Модель процесса сушки капли при наличии испарительной и сушильной стадий обезвоживания.	122
3.4.3. Модель процесса сушки капли высококонцентрированного раствора.	123

ГЛАВА 4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАСООБМЕНА
И ГИДРОДИНАМИКИ В ФАКЕЛЕ РАСПЫЛЕНИЯ**

4.1. Моделирование процессов теплообмена и гидродинамики в распылительных камерах с форсуночным распылением.	127
4.2. Моделирование процессов теплообмена в распылительных камерах с дисковым распылением раствора.	135
4.3. Моделирование теплообмена и гидродинамики в распылительной камере на основе струйного движения фаз.	149
4.4. Моделирование процесса теплообмена и гидродинамики в выпарной камере для многокомпонентных растворов.	175

ГЛАВА 5

**ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА ПРИ ОБЕЗВОЖИВАНИИ
КАПЕЛЬ В РАЗЛИЧНЫХ ПАРОГАЗОВЫХ СРЕДАХ**

5.1. Кинетика обезвоживания растворов в гелиевой и азотной средах.	184
5.2. Влияние упругих звуковых колебаний на интенсивность испарения капель.	196
5.3. Тепло- и влагообмен в системе «капля—перегретый пар».	206
5.4. Тепло- и массообмен при испарении капель растворов с бинарным растворителем.	232

ЧАСТЬ 2

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ДВУХСТАДИЙНОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ
ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ РАСТВОРОВ**

ГЛАВА 6

**ДВУХСТАДИЙНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ
ПРЕПАРАТОВ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

- 6.1. Получение порошковой формы натриевой соли стрептомицина 241
- 6.2. Усовершенствование процесса и конструктивных решений двухстадийного агрегата ИСА-ИТЭ-6 265
- 6.3. Получение порошковой формы различных биологически активных препаратов 276
- 6.4. Основные технико-экономические характеристики агрегата АИС-200 288

ГЛАВА 7

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ДВУХСТУПЕНЧАТОГО РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ
КОРМОВЫХ ПРОДУКТОВ**

- 7.1. Технология производства витаминизированных кормовых смесей (ЗЦМ) 294
- 7.2. Двухступенчатый испарительно-сушильный агрегат ИСАР-500(700) 300
- 7.3. Технология производства композиционного витаминного комплекса (биовит) . . . 307
- 7.4. Двухстадийный рециркуляционный испарительно-сушильный агрегат ИСАР-5000 313

ГЛАВА 8

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ**

- 8.1. Концентрирование фруктовых соков 315
- 8.2. Концентрирование экстракта табака 324
- 8.3. Технология распылительного концентрирования многокомпонентных растворов 329
- 8.4. Концентрирование соков в эрлифтном аппарате. 334

ГЛАВА 9

**МЕТОДИКИ РАСЧЕТА
РАСПЫЛИТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

- 9.1. Методика расчета распылительных аппаратов с форсуночным распылением 336
- 9.2. Методика расчета распылительных аппаратов с дисковым распылением. 340

Оглавление

9.3. Методика расчета распылительных сушильных камер с дисковым распылением по модели, учитывающей закрутку фаз	344
9.4. Методика расчета распылительного выпарного аппарата для растворов с многокомпонентным растворителем.	349
9.5. Методика и пример расчета габаритов распылительных камер испарительно-сушильного агрегата	351
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	359
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	360