



Бурдо, О. Г. Эволюция сушильных установок [Текст] : монография / Бурдо Олег Григорьевич. - Одесса : Полиграф, 2010. - 368 с. : табл., рис. - Библиогр.: 122 назв. - ISBN 978-966-8788-98-7.

Книга содержит сведения по развитию теории и техники сушки. В основе исследований - системный анализ теплотехнологий сушильного оборудования, модернизация конструкций на базе тепловых труб. Приведены научные основы тепломассопереноса паропылегазовых потоков в пучке термосифонов и результаты

производственных испытаний тепломассоутилизатора. Изложены принципы, опыт и примеры эффективного использования тепловых труб в новых конструкциях - блочных и рекуперативных сушилках. Обосновываются перспективы нового подхода - комбинации бародиффузионных и фильтрационных технологий при обезвоживании продуктов. Исследуется механизм бародиффузии, которая возникает в условиях импульсного микроволнового поля. Представлены результаты исследований механики движения и теплопереноса в системе «гравитационный зерновой слой - поверхность энергоподвода». Эффективность методов доказывается аналитически и иллюстрируется примерами исследований элементов блочной и рекуперативной сушилок. Уделено внимание методам инженерного расчета и оптимизации сушильного оборудования нового типа, вопросам теплоаэродинамической надежности установок. Изучены оригинальные режимы комбинированных способов обезвоживания зерна, энергетика которых имеет неоспоримые перспективы. Книга предназначена для студентов, магистров, аспирантов, докторантов, научных сотрудников, которые занимаются исследованием процессов сушки и разработкой сушильной техники. Книга представляет интерес для специалистов - проектировщиков сушильного технологического оборудования.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге изложено отношение автора к сложившейся ситуации в технологиях сушки. Высокая энергоемкость технологий, динамичный рост цен на энергоносители определяют острую необходимость снижения расхода топлива при сушке. Первые шаги автора были посвящены разработке систем утилизации теплоты отработавшего теплоносителя, результатом которых стали конструкции термосифонных теплоутилизаторов и оригинальные сис-

темы тепломассоутилизации для многообразных сушилок. Однако системы тепловой утилизации не в состоянии существенно повлиять на энергоемкость сушильной установки. Анализ энерготехнологий сушки сформировал у автора уверенность, что распространенные схемы конвективной сушки себя изжили. Их модернизация целесообразна только на действующих установках, новые сушилки следует конструировать на новых принципах [1], следует искать более совершенные схемы подвода энергии к продукту.

Новые возможности открываются при внедрении в сушильную технику совершенных тепловодов - тепловых труб и термосифонов. Именно термосифоны позволили найти автору эффективные схемы использования энергии в технологиях сушки, создать конструкции с комбинированными процессами при обезвоживании. Такие подходы позволяют снять с воздуха задачи теплоносителя и оставить только задачи диффузионной среды. Перевод сушильных установок на рекуперативный принцип подвода тепловой энергии предполагает повышение энергетического КПД зерносушильной установки с 40% до 80%.

Следующий шаг в эволюции сушильных установок связан с задачей организации частичного механического обезвоживания, что возможно при комбинации бародиффузионных технологий и принципов фильтрационной сушки. Эксперименты показали, что такие подходы способны снизить уровень потребления энергии при обезвоживании при 2МДж на 1кг испаренной влаги. Естественно, что предложенные принципы требуют серьезных конструкторских решений для обеспечения поточности, безопасности и производительности промышленных установок.

В книге обоснована позиция автора относительно некоторого несоответствия между градиентной моделью переноса при сушке А.В. Лыкова и моделью форм связи влаги П.А. Ребиндера. В первом случае строится поле суммарного влагосодержания в продукте, а во втором - устанавливается специфика поверхностной, капиллярной и абсорбционно-связанной влаги. Развитие модели А.В. Лыкова с учетом положений П.А. Ребиндера - сушка это не один процесс, а суперпозиция нескольких. Каждый процесс характеризуется своей движущей силой и своим кинетическим коэффициентом скорости процесса. Причем, при этом возможно и перераспределение между формами влаги в продукте. Исходя из представлений автора, в книге строится схема эволюции сушильной техники.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность коллегам за квалифицированный и добросовестный труд при экспериментальном моделировании процессов. Благодаря результатам к.т.н. Безбаха И.В (раздел 10), Зыкова А.В, (раздел 9), Гайды С. (разделы 3, 13), Крицкого В.И, (раздел 7), Мяо Юнсяна (раздел 7), Станевского О.Л. (раздел 8), Перетяки С.Н. (раздел 8), Терзиева С.Г. (раздел 8), инж. Воскресенской Е.В. (раздел 11), основные научные положения автора получили практические доказательства.

Автор выражает признательность за ценные замечания и советы, сделанные при рецензировании рукописи, д.т.н., чл.- кор. НАН Украины

Снежкину Юрию Федоровичу и д.т.н. Смирнову Генриху Федоровичу. Замечания и пожелания читателей будут приняты автором с благодарностью.

ВВЕДЕНИЕ

Сушка является ключевым процессом в большинстве пищевых технологий. Именно сушка определяет качество готового продукта, его себестоимость. Выделяются теоретические, технические и технологические аспекты сушки. Фундаментальные основы теории сушки сложились к середине прошлого столетия и базируются на работах А.В.Лыкова и П.А.Ребиндера [2,3]. Основываясь на этих положениях, развиваются несколько научных направлений в теории сушки. Аналитические исследования посвящаются моделям градиентного переноса и термодинамическим моделям. Феноменологическая модель А.В. Лыкова дополняется Луциком П.П. соотношениями для учета деформаций в материале [4]. Углубленный анализ кинетики сушки проводится в центре сушки ИТТФ под руководством А.А.Долинского [5]. В работах Ю.Ф.Снежкина и Н.И.Никитенко предложена оригинальная модель влагообмена [6], решаются проблемы повышения энергетической эффективности сушилок [7] и использования схем с термотрансформаторами [8].

Термодинамические основы сушки развиты как самостоятельное направление под руководством М.А.Гришина в харьковском центре сушки Н.И. Погожих и В.А.Поталовым [9]. Здесь же Шишко Л.С. предлагает использовать метод малого параметра, который для условий $Bi \leq 3$ дает возможность аналитического решения системы А.В.Лыкова.

Вместе с тем, аналитическое моделирование сушки хоть и имеет фундаментальный характер, дает только качественные результаты. Поэтому интенсивно развивается теория экспериментального моделирования сушки. Удачный шаг приближения теоретических основ к прикладным задачам сделан Г.К.Филоненко и М.А.Гришиным [10]. Разработанный ими метод обобщения результатов экспериментальных исследований получает широкое распространение. Известны модели, которые получены Лебедевым П.Д., Муштаевым В.И. и Плановским А.Н. на основе методов теории подобия [11,12]. Весомый вклад в развитие теории и техники сушки внесли Красников В.В., Кремнев О.А., Куц П.С., Леончик Б.И., Сажин Б.С., Романков П.Г., Рабинович Г.Д., и др. Усилиями выдающихся ученых созданы научные школы и центры сушки. Мировую известность имеют научные школы, которые объединены под руководством акад. Долинского А.А. в рамках центра сушки стран СНГ. Развитие фундаментальных и прикладных представлений в разнообразных задачах сушки получило в работах Рудобашты С.П., Коновалова В.И., Лебедева Д.П., Острикова А.Н., Ефремова Г. (Россия),

Акулича П.В., Павлюкевича Н.В. (Беларусь), Лупашко А.С. (Молдова), Календерьян В.А., Малецкой К.Д., Станкевича Г.К., Ханика Я.М (Украина) и др. [13 - 16].

Техника сушки развивалась по пути преимущественного наращивания конвективных сушилок [10]. Привлекательность этого способа сушки объясняется следующими обстоятельствами. Технически просто нагреть воздух, с помощью которого передать энергию высушиваемому продукту. Поток этого воздуха являлся и средой, воспринимающей влагу из продукта. Задача интенсивного переноса энергии от теплоносителя требовала перекачки в установке больших объемов воздуха. Разные технологии сушки устанавливали рекомендуемые температуры отработавшего теплоносителя. В пищевых технологиях диапазон температур выбросов изменяется от 55 до 150 °С. Серьезный температурный потенциал выбросов, и огромные их объемы приводят к значительным потерям энергии с отработавшим теплоносителем. Практически во всех конвективных сушилках больше половины затраченной энергии теряется. В условиях умеренных цен на энергоносители конвективные технологии сушки были вполне оправданными и их распространение целесообразно. Но ситуация на современных рынках энергоносителей, динамичные тенденции роста цен требуют неотложных решений по внедрению прогрессивных подходов в технологиях сушки, важным критерием оценки которых стали бы и энергетические характеристики.

Комплекс выполненных в ОНАПТ исследований [1] показывает, что резервы по сокращению расхода топлива в технологиях конвективной сушки практически исчерпаны. Утилизация теплоты отработавшего сушильного агента повышает эффективность использования энергии топлива [1] однако радикально изменить энергетику сушилки этот прием не способен. Поэтому, в ОНАПТ поставлена задача поиска принципиально новых подходов для реализации обезвоживания продуктов. Во-первых, это применение менее расточительных схем подвода энергии, использование относительно новых устройств для теплопередачи - тепловых труб и термосифонов [17]. Такой подход способствует резкому снижению объемов циркулирующего теплоносителя и, следовательно, сокращению потерь энергии с отработавшим теплоносителем [18]. Более того, появляется возможность решения второй важной задачи - эффективного использования и сырьевых ресурсов. Предложена система комплексной утилизации теплоты и пыли ценного пищевого продукта (сахара, кофе, сухого молока) из аэрозольных выбросов сушильной установки [19]. Внедрено в технологии сушки новое оборудование - тепломассоутилизатор, принцип работы которого учитывает специфику аэрозольных выбросов ряда пищевых технологий и особенности комбинированных процессов тепломассопереноса в системе тепловых труб [20].

Во-вторых, это системный анализ энерготехнологий сушильных комплексов и как результат предложения по эффективному использованию энергетических резервов и утилизация теплоты на разных уровнях ее

конверсии в установках. Создаются конструкции блочной и рекуперативной зерносушилок. Новые принципы организации энергоподвода к продукту позволяют вдвое повысить эффективность использования энергии топлива при сушке зерна [21]. Результаты исследований прошли апробацию на многочисленных международных конференциях [22-36].

В-третьих, это использование комбинированных способов для обезвоживания продукта. Согласованные действия импульсного электромагнитного поля и методов фильтрационной сушки дают возможность принципиально изменить схему удаления влаги из продукта. Комбинированные способы обезвоживания с привлечением бародиффузионных механизмов массопереноса способны снизить затраты энергии до 0,5 МДж на 1кг испаренной влаги [37].

В данной монографии не ставилась цель глубокого исследования теории сушки. Стержневым вопросом была энергетика технологий обезвоживания продуктов. И эволюция сушильных установок рассматривалась именно по этому, чрезвычайно важному для настоящего времени, вопросу.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
Список основных условных обозначений.....	8
ГЛАВА ПЕРВАЯ. НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ.....	10
1.1. Энергетика и экология конвективной сушки.....	10
1.2. Тепловой потенциал и запыленность отработавшего сушильного агента.....	14
1.3. Проблемы современных технологий сушки зерна.....	15
1.4. Энергетический менеджмент - эффективный инструмент совершенствования тепловых технологий сушки.....	25
1.5. Система энергетического мониторинга-основа последовательного совершенствования производства.....	30
1.6. Пути совершенствования сушильных энерготехнологий.....	34
ГЛАВА ВТОРАЯ. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ В ТЕХНИКЕ.....	36
2.1. Тепловые трубы и термосифоны - эффективные средства организации теплопередачи.....	36
2.2. Теплообменники на тепловых трубах и термосифонах в теплотехнологиях.....	39

2.2.1. Развитие техники на базе тепловых труб в США.....	39
2.2.2. Тепловые трубы в энергоёмких, технологиях Японии.....	42
2.2.3. Динамика внедрения термосифонных рекуператоров в Китае.....	46
2.2.4. Применение аппаратов с ТТ в Европе.....	50
2.2.5. Достижения в области тепловых труб в различных странах	55
2.3. Техничко-экономические показатели теплообменников на тепловых трубах.....	58
2.4. Классификация теплообменников на тепловых трубах по эксплуатационным признакам.....	62
2.5. Принципиальные схемы циркуляции теплоносителя.....	65
2.6. Тепловые трубы в сушильных технологиях.....	67

ГЛАВА ТРЕТЬЯ. МЕТОДЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЙ СУШКИ.....

3.1. Развитие методов энергетического менеджмента.....	72
3.1.1. Структурная модель сушильной установки.....	72
3.1.2. Метод иерархической оценки эффективности использования энергии при сушке.....	74
3.1.3. Методы анализа эффективности энерготехнологий по коэффициентам трансформации.....	76
3.2. Принципы построения моделей сложной технологической системы с различным уровнем иерархии.....	78
3.3. Метод исследования теплового состояния комплексов на основе электротепловой аналогии.....	83
3.4. Методика построения графа энерготехнологического комплекса.....	86
3.5. Решение задач теплового состояния энерготехнологического комплекса.....	91
3.6. Научно - методологические основы совершенствования энерготехнологий.....	91
3.6.1. Общая характеристика задач.....	91
3.6.2. Понятие потенциала и резерва сокращения энергопотребления.....	97
3.6.3. Оценка эффективности инвестиций в энерготехнологии по “принципу пирамиды”.....	100

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМ ПОДВОДА ЭНЕРГИИ ПРИ СУШКЕ ЗЕРНА.....

4.1. Классификация зерносушильных технологий.....	103
4.2. Пути совершенствования зерносушильных технологий.....	104
4.3. Тепловой баланс теплового генератора.....	106
4.4. Схемы с тепловой утилизацией.....	109
4.5. Зерносушилки второго поколения.....	113
4.6. Блочная зерносушилка.....	115
4.7. Рекуперативная зерносушилка.....	118
4.8. Зерносушилки третьего поколения.....	120
4.9. Направления развития теории и техники зерносушения.....	121

ГЛАВА ПЯТАЯ. СХЕМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	
ЗЕРНА. НОВЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ.....	124
5.1. Перевод шахтных зерносушилок на экологически чистую сушку.....	124
5.2. Термосифоны в схемах утилизации теплоты отработавшего теплоносителя.....	126
5.3. Слойовой теплообменник с термосифонами.....	130
5.4. Термосифонный регенератор теплоты сыпучих сред	132
5.5. Термомеханический агрегат с ротационным термосифоном	133
5.6. Разомкнутый телонасосный цикл сушки зерна.....	135
5.7. Комбинированная схема сушки сыпучего материала на основе тепловых труб и теплового насоса.....	139
5.8. Автономная термосифонная система охлаждения зерна в силосах.....	141
5.9. Задачи моделирования новых схем.....	143
ГЛАВА ШЕСТАЯ. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ	
ПРОЦЕССОВ СУШКИ.....	144
6.1. Классификация научных проблем и задачи моделирования	144
6.2. Физические и математические модели сушки.....	146
6.3. Развитие модели А.В. Лыкова.....	150
6.4. Решение нестационарной задачи теплопереноса в системе “зерновая масса - термосифон”.....	154
6.5. Задача стационарной теплопроводности слоя зерна с рядом термосифонов.....	160
6.6. Исследование тепломассопереноса движущегося зернового слоя в термосифонном пучке.....	162
6.6.1. Механизм теплоотдачи при движении зернистого слоя.....	162
6.6.2. Модель теплопереноса в системе “зерновой поток - термосифон”.....	163
6.6.3. Двухкомпонентная модель тепломассопереноса зернового потока в слоевых аппаратах.....	167
6.7. Моделирование тепломассопереноса в системе “вращающийся термосифон - слой дисперсного продукта”	172
6.7.1. Механизм теплопереноса на границе вращающегося термосифона и движущегося слоя.....	172
6.7.2. Постановка внешней задачи.....	173
6.7.3. Исследование внутренней задачи.....	178
6.7.3.1. Гидродинамика кольцевого течения внутри вращающегося термосифона.....	178
6.7.3.2. Гистерезис теплопередачи во вращающемся термосифоне.....	182
6.7.3.3. Кризис теплопередачи.....	184
6.7.3.4. Исследование теплопередачи в аппаратах с вращающимся термосифоном.....	188
6.8. Объемный коэффициент теплоотдачи зернового слоя.....	189

ГЛАВА СЕДЬМАЯ. МОДЕРНИЗАЦИЯ СУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ.....	194
7.1. Принципиальные схемы модернизации.....	194
7.2. Показатели эффективности теплообменников на тепловых трубах.....	196
7.3. Типоразмерный ряд воздухоподогревателей на тепловых трубах.....	202
7.4. Стендовые испытания воздухоподогревателя ТГ-2-200.....	206
7.5. Экспресс - анализ режимов работы теплообменников типа ТГ.....	210
7.6. Модернизация зерносушилки ДСП-32.....	212
7.6.1. Тепловой расчет калорифера первой зоны.....	213
7.6.2. Тепловой расчет калорифера второй зоны.....	219
7.6.3. Тепловой расчет термосифонных тепловых утилизаторов.....	221
7.7 Производственные испытания модернизированной рециркуляционной зерносушилки ДСП-32 с утилизатором на тепловых трубах.....	222
7.8. Эффективность внедрения утилизаторов на тепловых трубах в перерабатывающих отраслях АПК.....	225
7.8.1. Эффективность тепловой утилизации в зерносушильной технике.....	225
7.8.2. Эффективность тепловой утилизации при производстве кормов.....	228
8.1. ГЛАВА ВОСЬМАЯ. СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ И ПЫЛИ ПИЩЕВОГО ПРОДУКТА.....	231
8.1. Специфика потока отработавшего теплоносителя в сушильных установках пищевых производств	231
8.2. Теплофизическая модель.....	233
8.3. Моделирование процессов тепломассопереноса на поверхности термосифона.....	234
8.4. Трехзонная модель взаимодействия слоя пыли с конденсатом.....	236
8.5. Межкомпонентный массообмен в межрядном пространстве тепломассоутилизатора.....	237
8.6. Сушильные установки с тепломассоутилизатором.....	239
8.6.1. Конструкция тепломассоутилизатора.....	239
8.6.2. Внедрение системы тепломассоутилизации в линию производства сахара - рафинада	241
8.6.3. Модернизация линии сушки сахара- песка.....	244
8.6.4. Модернизация конвейерной сушилки.....	247
8.6.5. Внедрение тепломассоутилизатора в линии производства растворимого кофе.....	249
8.6.6. Применение тепломассоутилизатора в технологиях производства сухих молочных продуктов.....	252
ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. БЛОЧНЫЕ ЗЕРНОСУШИЛКИ.....	256
9.1. Специфика теплопереноса в системе "зерновой поток - тепловые трубы".....	256

9.2. Методики расчета теплоотдачи плотного слоя.....	256
9.3. Механика движения слоя зерна у поверхности термосифона.....	258
9.4. Механика движения слоя зерна в пучках термосифонов.....	264
9.5. Общая характеристика процесса обтекания зерном пучка труб.....	267
9.6. Теплоотдача цилиндрических труб гравитационному зерновому слою.....	268
9.6.1. Локальная теплоотдача.....	268
9.6.2. Теплообмен между движущимся плотным слоем зерна и поверхностью одиночной тепловой трубы.....	271
9.6.3. Теплоотдача рядов и пучков труб.....	276
9.6.4. Теплоотдача плоских труб зерновому потоку.....	278
9.7. Расчет блочной зерносушилки.....	280
ГЛАВА ДЕСЯТАЯ. РЕКУПЕРАТИВНЫЕ ЗЕРНОСУШИЛКИ.....	284
10.1. Классификация рекуперативных сушилок.....	284
10.2. Шахтные рекуперативные сушилки.....	286
10.2.1. Механика движения гравитационного слоя дисперсного материала в пучке труб.....	286
10.2.2. Аппаратурно - процессовая схема шахтной рекуперативной зерносушилки.....	287
10.2.3. Тепловой расчет и оптимизация параметров слоевого подогревателя.....	288
10.2.4. Инженерная методика теплового расчета термосифонного слоевого подогревателя зерна.....	295
10.3. Расчет термосифонно - механического аппарата с роторно - кондуктивной системой энергоподвода.....	290
10.4. Особенности конструирования рекуперативных сушильных установок.....	300
ГЛАВА ОДИНАДЦАТАЯ. КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ СУШКИ.....	305
11.1. Эффективность бародиффузионных технологий при обезвоживании.....	305
11.2. Механизм комбинированной ИЭМ - сушки.....	307
11.3. Математические модели процессов комбинированной ИЭМ- сушки.....	308
11.4. Приведение краевой задачи к модели в обобщенных переменных.....	311
11.5. Оценка параметров бародиффузии.....	312
11.6. Результаты экспериментальных исследований.....	314
11.7. Особенности конструирования установок для ИЭМ обезвоживания.....	318
ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ. ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА АППАРАТОВ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ В СУШИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ.....	320
12.1. Общая характеристика задач расчета и оптимизации	320

12.1.1. Классификация задач.....	320
12.1.2. Обобщенная структура расчета прямых задач.....	321
12.1.3. Особенности решения обратных задач.....	321
12.1.4. Постановка оптимизирующих задач.....	325
12.2. Обобщенная структура расчета аппаратов с тепловыми трубами.....	327
12.2.1. Структура термодинамических расчетов.....	327
12.2.2. Структура расчета конвективной теплоотдачи в пучках цилиндрических оребренных термосифонов.....	329
12.2.3. Структура расчета аэродинамического сопротивления.....	330
12.2.4. Расчет термического сопротивления термосифона	333
12.2.5. Структура расчета экономических характеристик.....	336
12.3. Методика расчета теплоутилизатора с шахматным пучком оребренных термосифонов	338
12.4. Коэффициентный метод расчета термосифонных рекуператоров.....	341
12.5. Схема расчета теплоутилизатора на плоских термосифонах.....	344
12.6. Оценка эффективности термосифонных рекуператоров.....	344
12.7. Экспресс - методика прогнозирования ресурсных характеристик термосифонного рекуператора	349
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	353
ЛИТЕРАТУРА.....	354