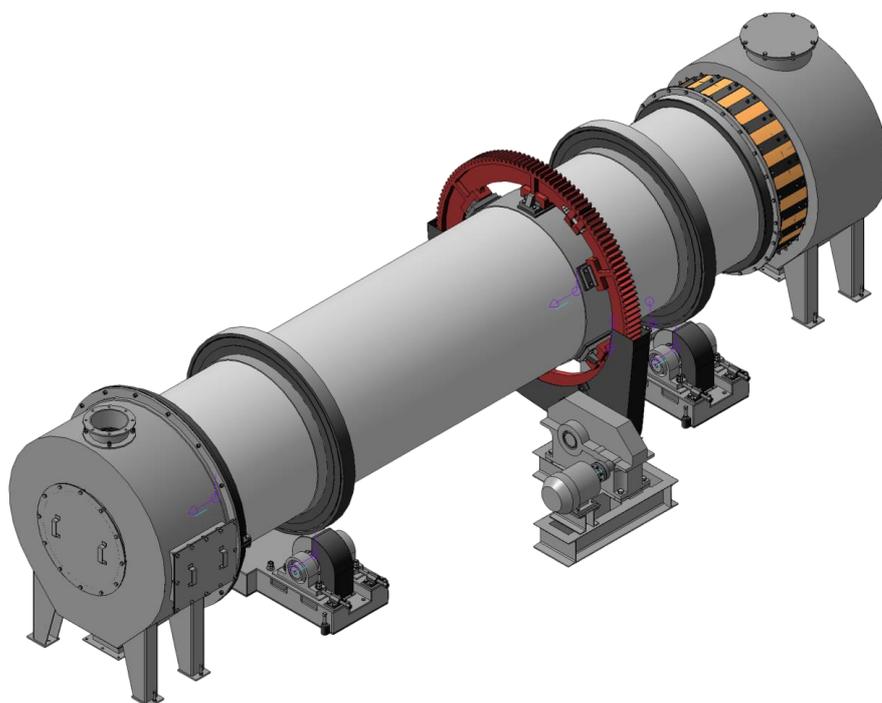


ІТМО

Р.А. Уваров, В.В. Митропов

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ВТОРИЧНЫМИ РЕСУРСАМИ: КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА



**Санкт-Петербург
2025**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Р.А. Уваров, В.В. Митропов
СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ
С ВТОРИЧНЫМИ РЕСУРСАМИ:
КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 15.04.02, 16.04.03, 20.04.01
в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2025

Уваров Р.А., Митропов В.В., Современные системы обращения с вторичными ресурсами: конвективная сушка – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 73 с.

Рецензент(ы):

Никитин Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент (квалификационная категория "ординарный доцент") образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы", Университета ИТМО.

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов магистратуры, обучающихся по направлениям 15.04.02, 16.04.03, 20.04.01. Издание актуализирует вопросы эффективного использования вторичных ресурсов в условиях перехода к экономике замкнутого цикла, фокусируясь на технологии конвективной сушки как ключевом инструменте устойчивого развития. В пособии систематизированы теоретические основы процессов сушки, включая классификацию форм связи влаги с материалом, типы сушильного оборудования и методы интенсификации процессов. Особое внимание уделено практико-ориентированному подходу: приведены императивные задачи с пошаговыми решениями, методики расчета параметров сушильных установок, а также примеры моделирования в среде SMath Solver, что позволяет студентам развивать навыки работы с реальными инженерными кейсами. Практические задания направлены на закрепление навыков проектирования и оптимизации систем сушки, а также на формирование компетенций в области экологической безопасности и ресурсосбережения. Издание рекомендуется для использования в рамках аудиторной и самостоятельной работы студентов, а также в качестве справочного материала для преподавателей и специалистов, занимающихся внедрением современных технологий обращения с вторичными ресурсами.



ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2025

© Уваров Р.А., Митропов В.В., 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СУШКИ	6
2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ СУШКИ	10
3 ДИНАМИКА СУШКИ	13
4 КИНЕТИКА СУШКИ.....	16
5 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА.....	21
6 МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК	23
7 КЛАССИФИКАЦИЯ СУШИЛОК.....	32
8 ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СУШИЛОК	34
8.1 Расчет распылительной сушилки форсуночного типа	34
8.2 Расчет сушилки барабанного типа	38
9 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	44
9.1 Рассчитать распылительную сушильную установку	44
9.2 Рассчитать барабанную сушильную установку	46
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	47
Приложение 1 Соотношение между различными единицами давления.....	48
Приложение 2 Характеристики пищевых продуктов, подвергаемых сушке	49
Приложение 3 Характеристики вторичных ресурсов, подвергаемых сушке в установках барабанного типа	50
Приложение 4 h - d диаграмма для высоких температур.....	52
Приложение 5 Термодинамические свойства сухого воздуха.....	53
Приложение 6 Термодинамические свойства влажного насыщенного воздуха	54
Приложение 7 Максимально допустимые скорости сушильного агента в барабане.....	54
Приложение 8 Напряжение рабочего объема барабана по испаренной влаге	54
Приложение 9 Технические характеристики распылительных сушилок	55
Приложение 10 Схема технологического процесса сушки с использованием распылительной сушилки	57
Приложение 11 Технические характеристики барабанных сушилок	58
Приложение 12 Пример использования библиотеки CoolProp в пакете математических вычислений Smath Studio	60
Приложение 13 Пример расчета распылительной сушилки форсуночного типа с помощью SMatch Studio	63
Приложение 14 Пример расчета сушилки барабанного типа с помощью SMatch Studio	67
ЛИТЕРАТУРА	72

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного производства и перехода к экономике замкнутого цикла эффективное использование вторичных ресурсов становится ключевым фактором устойчивого развития, а переработка ежегодно увеличивающегося количества отходов требует эффективных решений для их утилизации. В соответствии с Федеральным законом № 89 «Об отходах производства и потребления» основными задачами являются предотвращение вредного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду, а также вовлечение отходов в хозяйственный оборот как источников вторичного сырья [1]. Разработанное учебно-методическое пособие посвящено теоретическим и практическим аспектам одной из наиболее востребованных технологий обращения с вторичными ресурсами — сушке. Оно направлено на углубление знаний обучающихся в области технологий сушки, что особенно актуально для обучающихся по дисциплинам «Современные системы обращения с отходами», «Современные системы обращения с отходами и промышленный симбиоз» (направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», 20.04.01 «Техносферная безопасность») и «Инженерная термодинамика» (направление подготовки 16.04.03 «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения») и другим студентам, изучающим технологические решения в области рециклинга вторичных ресурсов, а также практические аспекты и закономерности преобразования и передачи тепловой энергии.

В пособии представлена понятийная база, включая существующие классификации форм связи влаги с материалом, видов сушки и оборудования, что способствует более глубокому пониманию предмета. Четкое изложение теоретических основ, а также систематизация знаний о различных методах сушки позволяют студентам ориентироваться в данной тематике. Особое внимание уделено императивным задачам, решение и разбор которых подробно представлены в соответствующих главах пособия. Это значительно облегчает процесс закрепления материала и помогает студентам применять теоретические знания на практике. Практические задания и примеры расчетов, приведенные в пособии, способствуют развитию аналитических навыков и умения работать с реальными данными.

Пособие также включает методики расчета оборудования для сушки, что является важным аспектом подготовки специалистов в данной области. Разобранные примеры расчетов в *SMath Solver* позволяют студентам не только освоить теорию, но и применить ее на практике, что делает учебный процесс более интерактивным и практико-ориентированным.

Данное учебно-методическое пособие является ценным ресурсом для студентов и преподавателей, стремящихся к углубленному изучению технологий сушки вторичных ресурсов, а также к развитию практических навыков в этой области. Приложения пособия содержат реальный справочный материал, способствующий выполнению индивидуальных заданий, а также приобретению активных навыков самостоятельного поиска обучающимися информации, необходимой для решения инженерных задач.

Для более глубокого рассмотрения отдельных вопросов могут быть использованы фундаментальные научные труды А.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, О. Флореа, А.М. Бакластова, Ю.И. Дытнерского, И.Л. Иоффе и М. Massoud, а также практико-ориентированные работы В.Ю. Лакомкина, А.В. Акулич, Е.В. Ганина, W.M. Kays, Y. Cengel и других авторов, приведенные в списке литературы.

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СУШКИ

Рациональное обращение с вторичными ресурсами способствует повышению экологической безопасности производственных процессов. Эффективная **утилизация отходов**, представляющая собой деятельность, связанную с использованием отходов на различных этапах технологического цикла, а также обеспечением повторного (вторичного) использования или переработки списанных изделий, позволяет эффективно реализовывать механизм ресурсосбережения. В данном учебном пособии рассматривается одна из современных технологий обработки вторичных ресурсов — **тепловая или конвективная сушка**, т.е. термическая обработка материала, приводящая к удалению влаги и/или образованию твердого остатка [2].

Тепловая сушка представляет собой сложный теплотехнологический процесс, который приводит не только к **обезвоживанию**, но и к значительным изменениям физико-химических свойств и характеристик высушиваемого материала. Сушка включает в себя совокупность тепловых и массообменных процессов, которые происходят как внутри влажного материала (внутренняя задача сушки), так и на его поверхности (внешняя задача сушки), обеспечивая его обезвоживание [9]. Знание **свойств сушимого материала** является ключевым для выбора эффективного метода и режима сушки, а также для проектирования рациональных сушильных установок. Выявление общих физических закономерностей в процессах переноса теплоты и массы внутри влажных материалов, а также анализ их структурно-механических характеристик позволяют классифицировать сушимые материалы на три группы:

- **Капиллярно-пористые** материалы: при обезвоживании практически не изменяют свои размеры. При глубоком обезвоживании они могут превращаться в дисперсные материалы, такие как обожженные керамические изделия или активированный уголь.
- **Коллоидные** материалы: при изменении содержания влаги существенно изменяют свои размеры, сохраняя эластичные свойства. Примеры включают желатин и мучное тесто.
- **Капиллярно-пористые коллоидные** материалы: имеют капиллярно-пористую структуру с эластичными стенками капилляров, которые способны к набуханию при увлажнении и усыханию при обезвоживании. К этой группе относятся торф, ткани, кожа и древесина [5].

Изучение закономерностей переноса теплоты и массы при сушке представителей каждой из групп позволяет прогнозировать процесс сушки. Влага из внутренних слоев материала перемещается к поверхности и испаряется в окружающую среду, что требует затрат энергии для преодоления сил сцепления молекул влаги. Таким образом, свойства влажных материалов и скорость

процессов переноса зависят от форм связи влаги с материалом. Согласно классификации П.А. Ребиндера, выделяются три **формы связи влаги с материалом** по убыванию энергии [5, 17]:

- химическая;
- физико-химическая;
- физико-механическая.

Химически связанная с материалом влага формируется в определенных количественных пропорциях и включает два типа: ионную (представленную гидроксильными ионами) и молекулярную (в виде кристаллогидратов). Эти связи могут быть разрушены либо в процессе химической реакции, либо при прокаливании. Обычно такая влага не удаляется из материалов во время сушки, поэтому в рамках данного курса мы не будем ее рассматривать.

Физико-химическая влага, имеющая менее строгие количественные соотношения, состоит из адсорбированного пара, который оседает на поверхности материала в порах и капиллярах, образуя **адсорбционно связанную влагу**. Также к этой категории относится влага, проникающая внутрь материала под воздействием осмотического давления, что приводит к избирательной диффузии влаги через полупроницаемую оболочку, также называемую **осмотически связанной влагой**. Адсорбционно связанную влагу делят на моно- и полимолекулярную в зависимости от энергии связи. Мономолекулярная влага обладает физическими свойствами, отличающимися от обычной воды: она ведет себя как упругое твердое тело, имеет пониженную температуру замерзания до -70°C и повышенную плотность. Осмотически связанная влага также включает структурную влагу, которая формируется при росте и развитии организма, например, растительных клеток в древесине; по своим свойствам она схожа с обычной жидкостью.

Физико-механическая влага, удерживаемая в неопределенных количествах, включает влагу, находящуюся в микро- и макрокапиллярах и порах материала, а также влагу смачивания, которая проникает в материал при его контакте с жидкостью [9].

Микрокапиллярами называют капилляры, в которых длина свободного пробега молекул много меньше диаметров капилляров. В них давление насыщенного пара над поверхностью мениска меньше давления насыщенного пара над открытой плоской поверхностью жидкости, поэтому возможен процесс капиллярной конденсации пара. Для нормальных условий капилляр радиусом $R < 10^{-5}$ см относится к микрокапиллярам. Влага, содержащаяся в микро- и макрокапиллярах, называется свободной. На рисунке 1 схематически показаны формы связи и виды влаги коллоидного капиллярного тела.

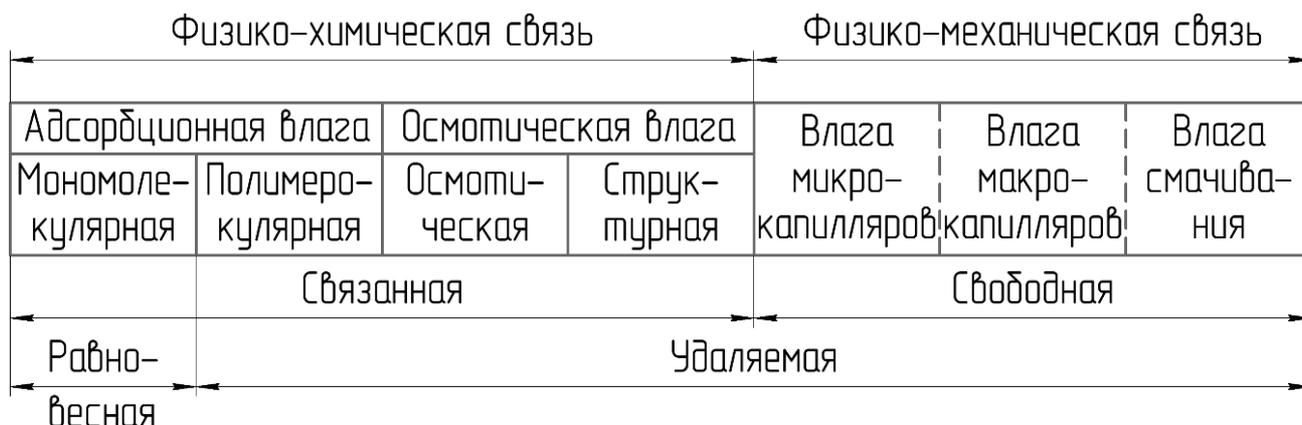


Рисунок 1 – Классификация форм связи влаги с материалом

Количество влаги $G_{вл}$, содержащейся в материале в расчете на единицу массы абсолютно сухого материала G_c называется **влажностью материала**:

в долях:

$$\omega^c = \frac{G_{вл}}{G_c}; \quad (1)$$

в процентах:

$$\omega^c = \frac{G_{вл} \cdot 100}{G_c}. \quad (2)$$

В сушильной технике используют иногда понятие **влажности материала** в расчете на единицу общей массы:

в долях:

$$\omega^o = \frac{G_{вл}}{G_c + G_{вл}}; \quad (3)$$

в процентах:

$$\omega^o = \frac{G_{вл} \cdot 100}{G_c + G_{вл}}. \quad (4)$$

Очевидна связь между влажностями на сухую и на общую массу:

в долях:

$$\omega^c = \frac{\omega^o}{1 - \omega^o} \quad \text{и} \quad \omega^o = \frac{\omega^c}{1 + \omega^c}; \quad (5)$$

в процентах:

$$\omega^c = \frac{\omega^o \cdot 100}{1 - \omega^o} \quad \text{и} \quad \omega^o = \frac{\omega^c \cdot 100}{1 + \omega^c}. \quad (6)$$

Так как масса абсолютно сухого материала в процессе сушки остается неизменной, то использование понятия влагосодержания предпочтительнее, что значительно упрощает расчеты процесса обезвоживания [6, 9].

Контрольные вопросы:

1. Что такое тепловая сушка? Какие процессы она в себя включает?
2. Какие группы материалов выделяются по их структурно-механическим характеристикам при сушке?
3. Какие формы связи влаги с материалом выделяются по классификации П.А. Ребиндера?
4. Что такое химически связанная влага и почему она обычно не удаляется при сушке?
5. Какие виды физико-химической влаги выделяют? Чем они характеризуются?

2 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Для осуществления процесса сушки к влажному материалу необходимо подводить теплоту. В зависимости от способа подвода теплоты различают сушильные установки:

- конвективные;
- кондуктивные;
- терморadiационные;
- электромагнитные;
- комбинированные (конвективно-радиационные, конвективно-кондуктивно-радиационные и т.д.).

За исключением специальных случаев (сушка в замороженном состоянии, сушка со сбросом давления и т. д.), сушка представляет собой перемещение влаги внутри материала в зону фазового превращения, затем парообразование и удаление пара в окружающую среду. Испарение влаги создает перепад влагосодержания между внутренними и поверхностными слоями материала, что вызывает непрерывное движение влаги в направлении к поверхности материала и уменьшение его локального u и среднего ω^c влагосодержаний [6] (рисунок 2).

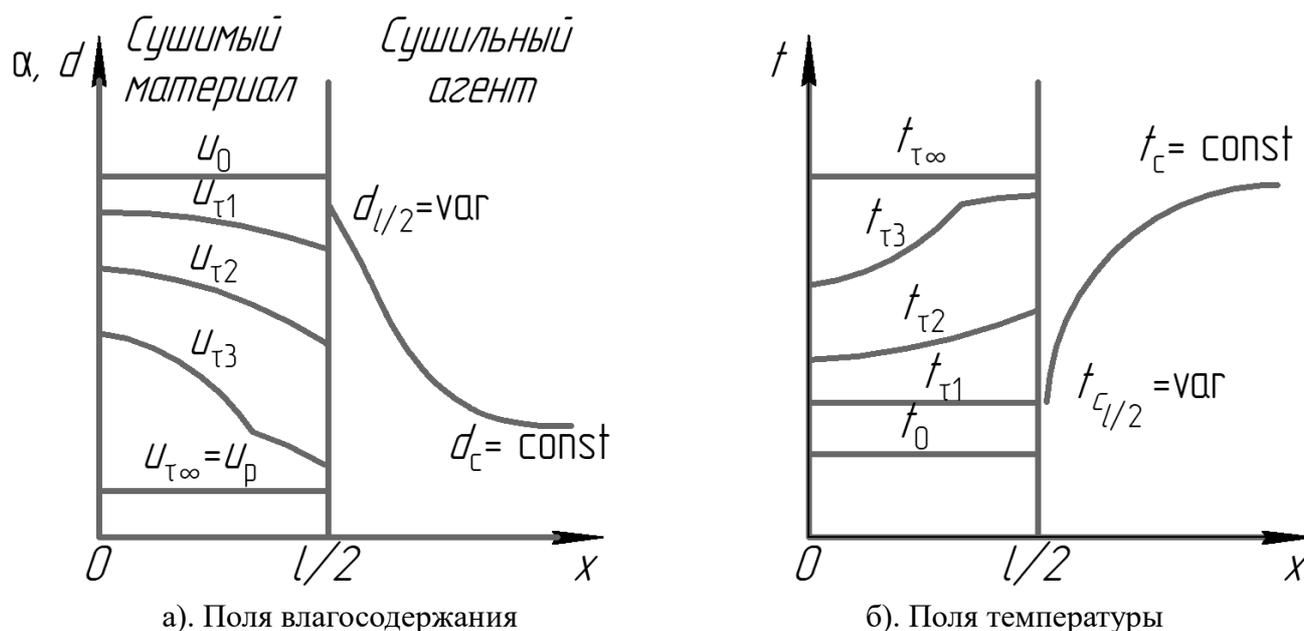


Рисунок 2 – Общая схема тепло- и массообмена влажного тела с сушильным агентом

Во влажном теле существуют изменяющиеся во времени влажная зона и зона испарения. В первой из них распределение влагосодержания и температуры удовлетворительно описывается уравнениями параболы, а во второй – линейно. У поверхности влажной зоны, где испаряется наибольшее количество влаги,

сушильный агент (при конвективной сушке) находится в состоянии насыщения (относительная влажность $\varphi = 1,0$). У внешней поверхности зоны испарения парциальное давление паров удаляемой жидкости равно давлению паров в сушильном агенте. Поскольку это давление меньше давления насыщенного пара над свободной поверхностью жидкости, его значение зависит от влагосодержания и температуры материала [7]. Постоянное изменение этих величин во времени (рисунок 2) обуславливает переменность влагосодержания сушильного агента $d_{1/2}$ у поверхности материала. По условиям сушки влагу, содержащуюся в материале, можно разделить на равновесную и удаляемую. Равновесной влагой называют ту часть общей влаги в материале, которая не может быть удалена при данных условиях сушки. Влагосодержание материала, соответствующее этому количеству влаги, называют равновесным ω_p^c . Количество содержащейся в материале влаги, которая находится в равновесии с насыщенной газообразной средой ($\varphi = 1,0$), определяет гигроскопическое влагосодержанием ω_r^c . Если влагосодержание материала ω^c меньше ω_r^c , то давление пара в материале p_n меньше давления насыщенного пара над свободной поверхностью жидкости p_n и зависит от влагосодержания и температуры материала. При $\omega^c > \omega_r^c$ $p_n = p_n$ и зависит только от температуры материала. Эта температура при конвективной сушке соответствует температуре адиабатного испарения жидкости. В определенных условиях температура смоченного термометра соответствует температуре испаряющейся жидкости. Тогда температуру адиабатного испарения можно называть температурой мокрого термометра t_m [9].

При постоянных параметрах режима конвективной сушки (температура сушильного агента $t_c = \text{const}$, его относительная влажность $\varphi_c = \text{const}$ и скорость $\omega_c = \text{const}$) в интервале влагосодержаний от начального $\omega_n^c > \omega_r^c$ до ω_r^c будет сохраняться постоянной не только температура материала, но и плотность потока влаги q_m от его поверхности в окружающую среду. В этом случае вся теплота, подводимая к влажному материалу, расходуется только на испарение влаги [8]:

$$q_m = \frac{\alpha \cdot (t_c - t_m)}{r}, \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от сушильного агента к влажной поверхности материала;

t_c – температура сушильного агента, °С;

t_m – температура поверхности материала, °С;

r – тепло парообразования, кДж/кг.

Коэффициент теплоотдачи к влажному телу α , как показывают многочисленные экспериментальные данные, выше, чем коэффициент теплоотдачи к сухому телу. Увеличение коэффициента теплоотдачи можно объяснить гипотезой об объемном испарении, выдвинутой А.В. Лыковым. Согласно этой гипотезе, испарение влаги происходит не только внутри или на поверхности сушимого тела, но и в небольшом пространстве над поверхностью тела, куда выносятся субмикроскопические капли влаги, увлекаемые потоком сушильного агента с поверхности тела.

Существующие в настоящее время полуэмпирические или эмпирические зависимости позволяют рассчитывать α , а следовательно, и q_m при удалении влаги в интервале влагосодержаний от ω_n^c до ω_r^c . Однако определение общей продолжительности сушки до требуемого конечного влагосодержания материала, лежащего в интервале $\omega_p^c \leq \omega_k^c < \omega_r^c$, возможно лишь при известных закономерностях кинетики сушки.

Контрольные вопросы:

1. Какие типы сушильных установок различают в зависимости от способа подвода теплоты?
2. Как происходит процесс сушки в конвективных сушильных установках?
3. Что такое равновесная влага и как она связана с гигроскопическим влагосодержанием?
4. Какие параметры режима сушки влияют на критическое влагосодержание материала?
5. Какова роль сушильного агента в процессе сушки?

3 ДИНАМИКА СУШКИ

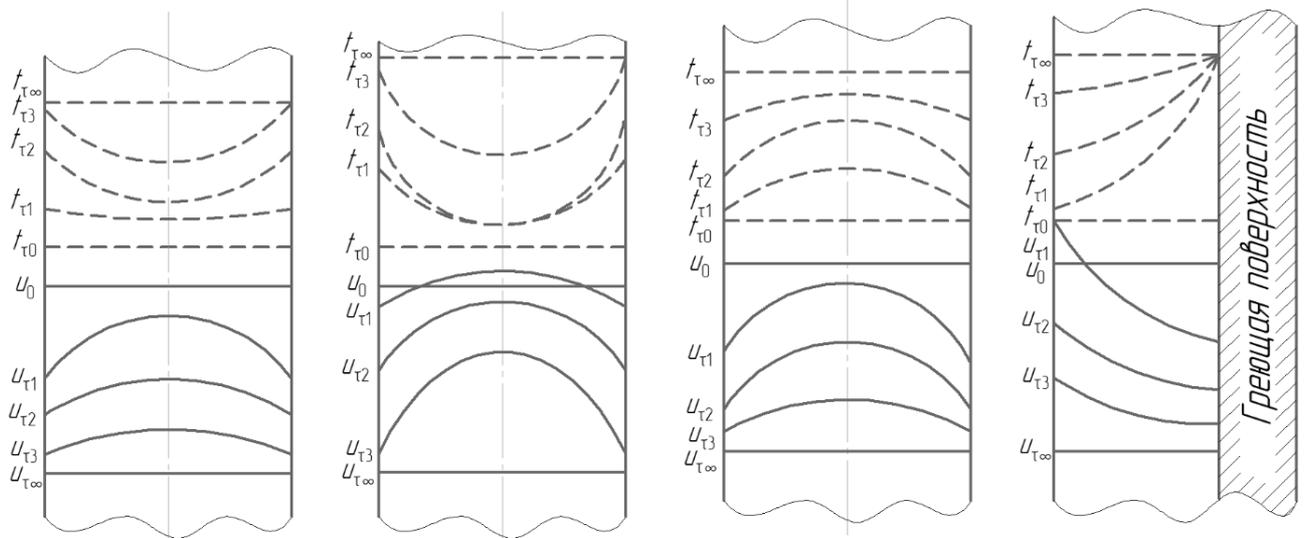
Динамику сушки определяют изменения локальных влагосодержаний u и температуры t внутри материала в пространстве и во времени.

Изучение переноса массы (влаги) и теплоты внутри материала основывается на двух основных методологических подходах: молекулярно-кинетическом и термодинамическом. Молекулярно-кинетический метод фокусируется на микроскопической картине происходящих процессов, исследуя поведение отдельных молекул и их взаимодействие. Он позволяет глубже понять физическую сущность явления, однако его применение для количественного описания макроскопических систем часто затруднено из-за сложности моделирования поведения огромного числа частиц. Термодинамический метод, напротив, изучает макроскопическую картину переноса, оперируя такими усредненными параметрами, как влагосодержание и температура. Он является обобщением многочисленных эмпирических наблюдений за свойствами макроскопических систем и позволяет получать количественные описания полей влагосодержания и температуры, необходимые для практических расчетов и оптимизации процессов сушки [5].

Перемещение влаги внутри материала происходит в двух фазах: жидкой и парообразной. При этом с уменьшением общего влагосодержания материала доля влаги, находящейся в парообразном состоянии, возрастает. Это связано с тем, что по мере удаления влаги из материала уменьшается количество свободной жидкости, способной к перемещению под действием капиллярных сил или гравитации, в то время как испарение влаги с поверхности и из пор материала продолжается.

Сложная структура реального влажного материала, неоднородность его состава, а также непрерывное изменение средних и локальных влагосодержаний и температуры создают крайне сложную картину процессов переноса, что затрудняет получение строгих количественных решений на основе молекулярно-кинетического подхода. Именно поэтому для практического описания полей влагосодержания и температуры чаще всего используется термодинамический метод, позволяющий получить обобщенные зависимости на основе экспериментальных данных.

На рисунке 3 показаны типичные поля влагосодержаний и температур материала при различных способах подвода теплоты.



а). Сушка нагретым воздухом б). Терморadiационная сушка в). Электромагнитная (высокочастотная) сушка г). Кондуктивная сушка

Рисунок 3 – Эволюция полей влагосодержания и температуры материала

При сушке нагретым воздухом (рисунок 3а) наблюдается характерное распределение: влагосодержание центральных слоев тела, как правило, выше, чем поверхностных, в то время как температура поверхности, наоборот, выше, чем в центре.

Такое распределение влагосодержания и температуры приводит к возникновению двух противоположно направленных потоков: поток влаги $q_{m\psi}$ под действием градиента влагосодержания направлен от центра материала к поверхности, а поток тепла $q_{m\tau}$ под действием градиента температуры – от поверхности вглубь тела. Поскольку суммарный поток влаги q_m направлен к поверхности (что и обеспечивает процесс обезвоживания материала), поток тепла $q_{m\tau}$ является своего рода препятствующим фактором, уменьшающим общий поток влаги q_m . Иными словами, подвод тепла к поверхности не только обеспечивает испарение влаги, но и создает температурный градиент, который частично препятствует движению влаги изнутри материала к поверхности.

Одним из распространенных методов является *терморadiационная сушка* (рисунок 3б). В этом случае, в отличие от конвективной сушки, создается значительно более высокий градиент температуры ∇t . Это приводит к тому, что в начальный момент времени влагосодержание центральных слоев материала может превышать исходное значение. Более высокий градиент влагосодержания $\nabla \psi$ при терморadiационной сушке по сравнению с конвективной может привести к ухудшению качества материала, особенно склонного к растрескиванию. Чем выше градиент температуры ∇t , тем выше напряжения, возникающие внутри материала, что увеличивает риск деформаций и трещин.

Принципиально иной подход реализуется в *электромагнитной (высокочастотной) сушке* (рисунок 3в). Особенностью этого метода является подвод энергии непосредственно ко всему объему высушиваемого материала, помещенного в поле электрического конденсатора. Благодаря этому достигается сонаправленность потоков массы, обусловленных влажностью $q_{m_{\nabla u}}$ и термовлажностью $q_{m_{\nabla t}}$, – от центра к поверхности. Такое наложение потоков обеспечивает наиболее интенсивное удаление влаги и, как следствие, более быструю сушку.

В случае *кондуктивной сушки* (рисунок 3г) влага в жидкой фазе перемещается под действием градиента влагосодержания ∇u к греющей поверхности, где происходит ее испарение. Образовавшийся пар удаляется с внешней поверхности материала. Этот метод имеет свои особенности, например, при сушке материалов, пропитанных суспензией (как при нанесении красителя), кондуктивная сушка может привести к скоплению красящего вещества вблизи греющей поверхности, что необходимо учитывать при выборе технологического режима.

Таким образом, каждый из рассмотренных методов сушки создает свои уникальные условия для переноса массы и тепла, что отражается на распределении влагосодержания и температуры внутри материала. Знание закономерностей перемещения массы внутри материала, понимание полей влагосодержания и температуры, а также учет значений и характера изменения движущих сил позволяют обоснованно выбирать способы и режимы сушки для достижения оптимального результата. Правильный выбор метода сушки и его параметров позволяет не только эффективно удалять влагу, но и сохранять качество и свойства обрабатываемого материала.

Контрольные вопросы:

1. Какие методы используют для изучения переноса массы и теплоты внутри материала?
2. Как изменяются влагосодержание и температура материала при различных способах сушки?
3. Какие особенности характерны для терморadiационной сушки?
4. Как работает электромагнитная (высокочастотная) сушка? В чем ее отличие от других методов?
5. Какие факторы влияют на распределение влагосодержания и температуры внутри материала при сушке?

4 КИНЕТИКА СУШКИ

Кинетика сушки описывает изменения во времени средних по объему высушиваемого материала влагосодержания ω^c и температуры t . Закономерности $\omega^c = f(\tau)$ и $t = f(\tau)$, где τ – время, лежат в основе определения продолжительности сушки, количества испаренной влаги и необходимой теплоты. Графическое отображение зависимости $\omega^c = f(\tau)$ известно как кривая сушки [5].

Изменение влагосодержания в единицу времени $\frac{d\omega^c}{d\tau}$ называют скоростью сушки, а графические зависимости вида $\frac{d\omega^c}{d\tau} = f(\omega^c)$, $\frac{d\omega^c}{d\tau} = f(\tau)$ – кривыми скорости сушки.

Рассмотрим кинетические закономерности сушки материала при удалении из него как свободной, так и связанной влаги на примере конвективной сушки с постоянными параметрами режима: температура $t_c = \text{const}$, относительная влажность $\phi_c = \text{const}$ и скорость $\omega_c = \text{const}$ (рисунок 4). На кривой сушки можно выделить ряд характерных периодов, каждый из которых отражает определенные физические процессы.

Период прогрева (участок **0-а**) характеризуется увеличением температуры материала от t_n до t_m , если $t_n < t_m$ (если же $t_n > t_m$, то t_n снижается до t_m), уменьшением среднего влагосодержания от ω_n^c до промежуточного значения и увеличением скорости сушки $\frac{d\omega^c}{d\tau}$ от нуля до максимального значения N .

Между скоростью сушки и плотностью потока влаги из материала q_m существует взаимосвязь [18]:

$$\frac{d\omega^c}{d\tau} = \frac{q_m(\tau) \cdot F}{\rho_0 \cdot V}, \quad (8)$$

где ρ_0 – плотность сухого материала, кг/м³;
 F – площадь поверхности, м²;
 V – объем материала, м³.

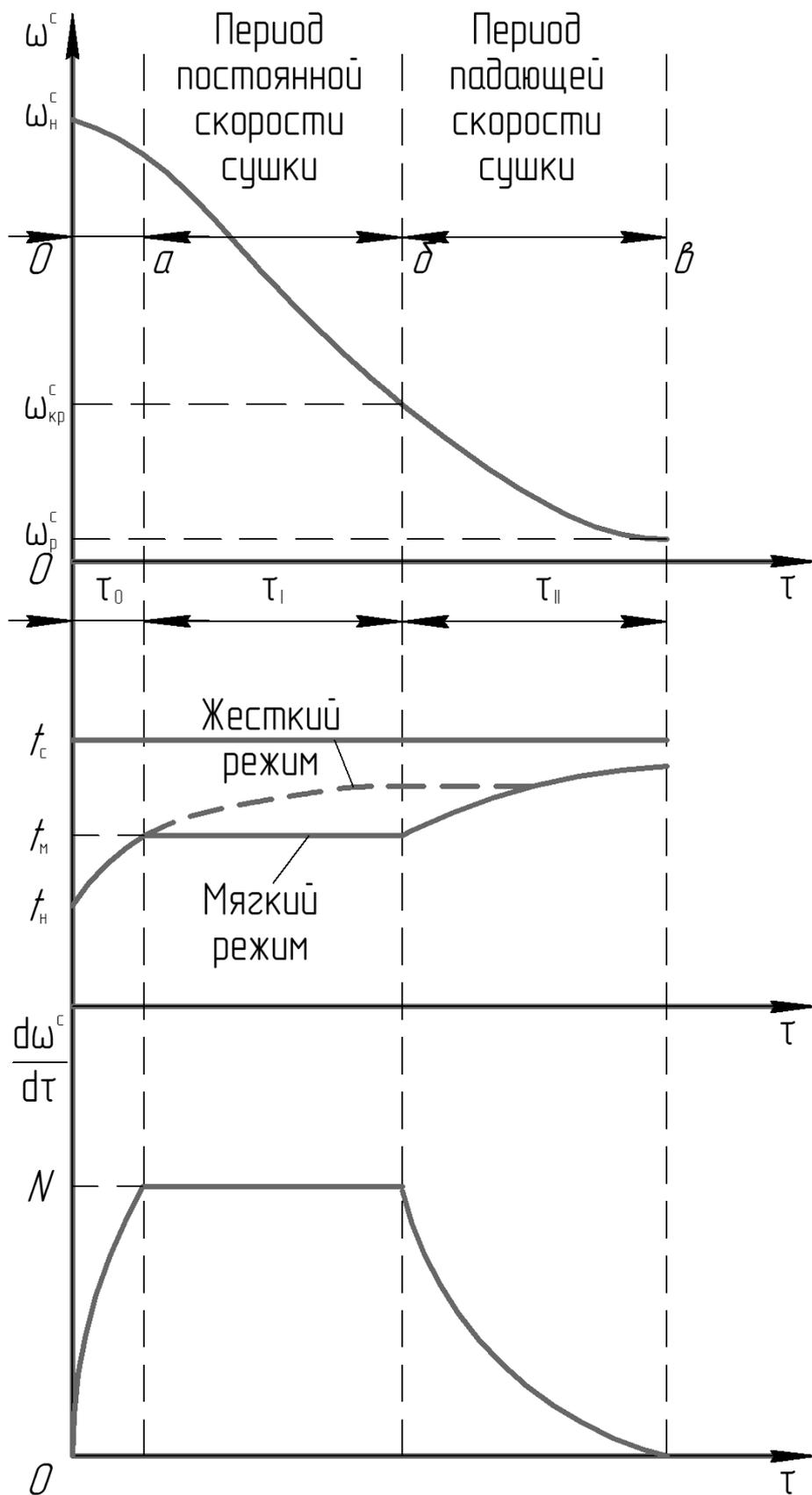


Рисунок 4 – Типичные кривые сушки, скорости сушки и изменения температуры материала при конвективном способе подвода теплоты

Согласно формуле (8), для периода постоянной скорости плотность потока влаги q_m является величиной постоянной. Следовательно, для материала, не подверженного усадке в процессе сушки (то есть при постоянных P и V), скорость сушки $\frac{d\omega^c}{dt} = \text{const}$ также постоянна, а изменение влагосодержания ω_n^c во времени имеет линейный характер.

При мягких режимах сушки температура материала остается практически неизменной на протяжении этого периода и равна температуре мокрого термометра. Парциальное давление пара у поверхности испарения в этом случае соответствует давлению насыщения при температуре мокрого термометра. Однако при жестких режимах, характеризующихся высокой интенсивностью испарения, средняя температура материала в периоде постоянной скорости начинает непрерывно расти (что отображено штриховой кривой на рисунке 4). Это различие обусловлено интенсивностью теплоподвода и скоростью удаления влаги с поверхности.

Период постоянной скорости сушки продолжается до достижения **критического влагосодержания** $\omega_{кр}^c$. Этот момент (рисунок 4) соответствует равенству внутридиффузионного (сопротивление переносу влаги внутри материала) и внешнедиффузионного (сопротивление переносу пара в пограничном слое) сопротивлений. При достижении критического влагосодержания влагосодержание на поверхности испарения становится равным гигроскопическому или даже меньше него, в то время как в центре материала оно остается значительно выше гигроскопического. Таким образом, критическое влагосодержание можно интерпретировать как среднеинтегральное влагосодержание материала, при котором на поверхности достигается гигроскопическое влагосодержание и начинается следующий этап сушки. После достижения критического влагосодержания начинается **период падающей скорости сушки** (или второй период сушки, участок б-в на рисунке 4). В течение этого периода температура материала непрерывно повышается, стремясь к температуре сушильного агента t_c , а скорость сушки, напротив, непрерывно убывает от своего максимального значения N до нуля. Скорость сушки достигает нулевого значения при достижении материалом **равновесного влагосодержания** ω_p^c . Равновесное влагосодержание соответствует динамическому равновесию, при котором поток влаги из материала за счет испарения равен потоку влаги из окружающей среды к поверхности материала (конденсация). В этом состоянии количество влаги в материале остается постоянным во времени [17].

Форма кривых скорости сушки (рисунок 5) определяется характером связи влаги с материалом. Простейшая, линейная зависимость (кривая 1) характерна для тонких волокнистых материалов, таких как бумага или тонкий картон. Кривая 2 соответствует сушке коллоидных (желеобразных) тел, а кривая 3 – капиллярно-

пористых тел. Для этих материалов характерно наличие одного значения критического влагосодержания. Материалы со сложной структурой и различными формами связи влаги демонстрируют более сложные кривые скорости сушки. Например, кривая 4, характерная для сушки глины, и кривая 5, типичная для сушки сухарей, имеют второе значение критического влагосодержания $\omega_{кр2}^c$. Для многих материалов эта точка соответствует началу удаления адсорбционно-связанной влаги, в то время как в диапазоне от $\omega_{кр1}^c$ до $\omega_{кр2}^c$ удаляется влага из микрокапилляров [18].

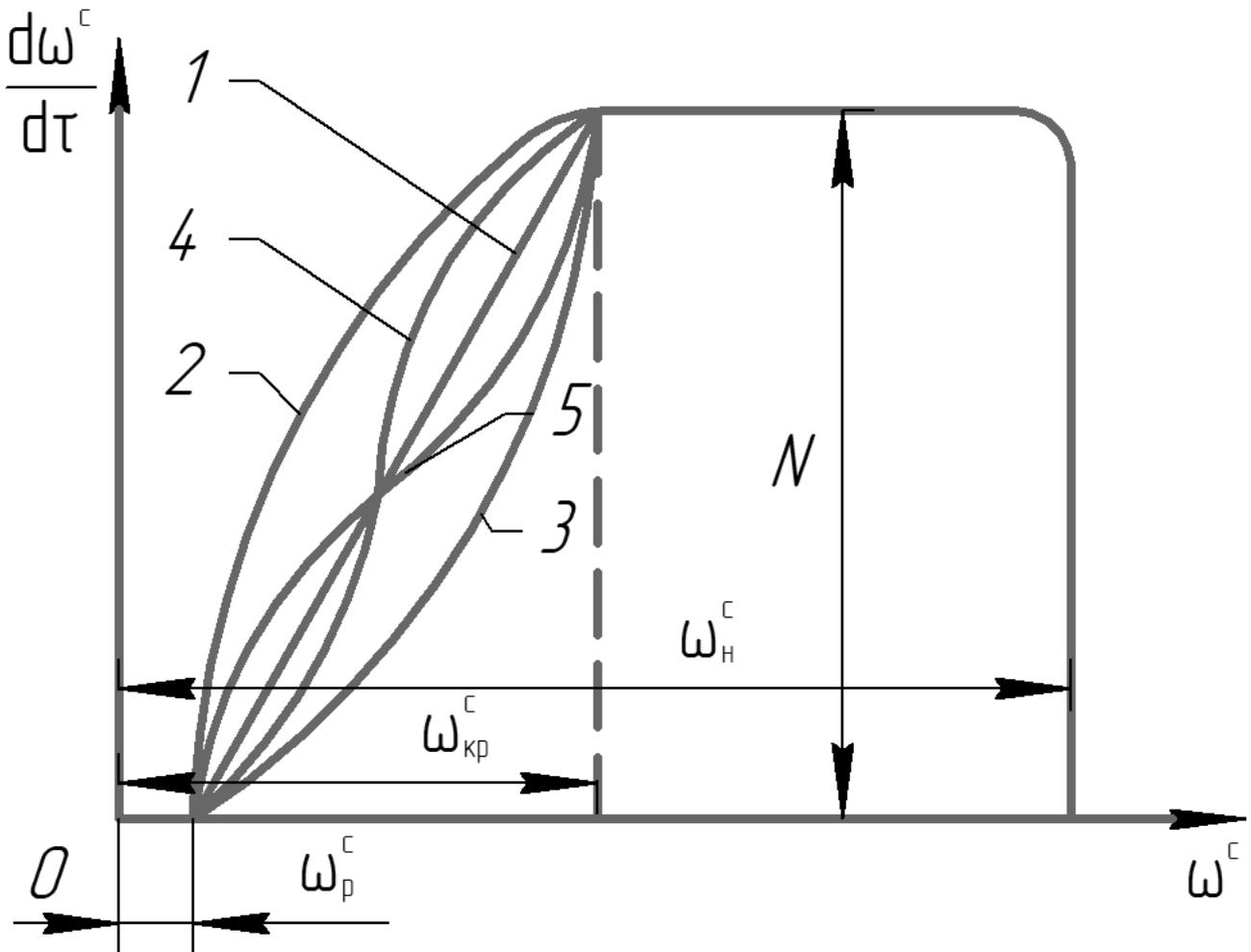


Рисунок 5 – Кривые скорости сушки наиболее распространенных групп материалов

Критическое влагосодержание при конвективной сушке зависит от вида и размера материала и параметров режима сушки t_c , ω_c и ϕ_c . Характер их влияния на $\omega_{кр}^c$ приведен на рисунке 6.

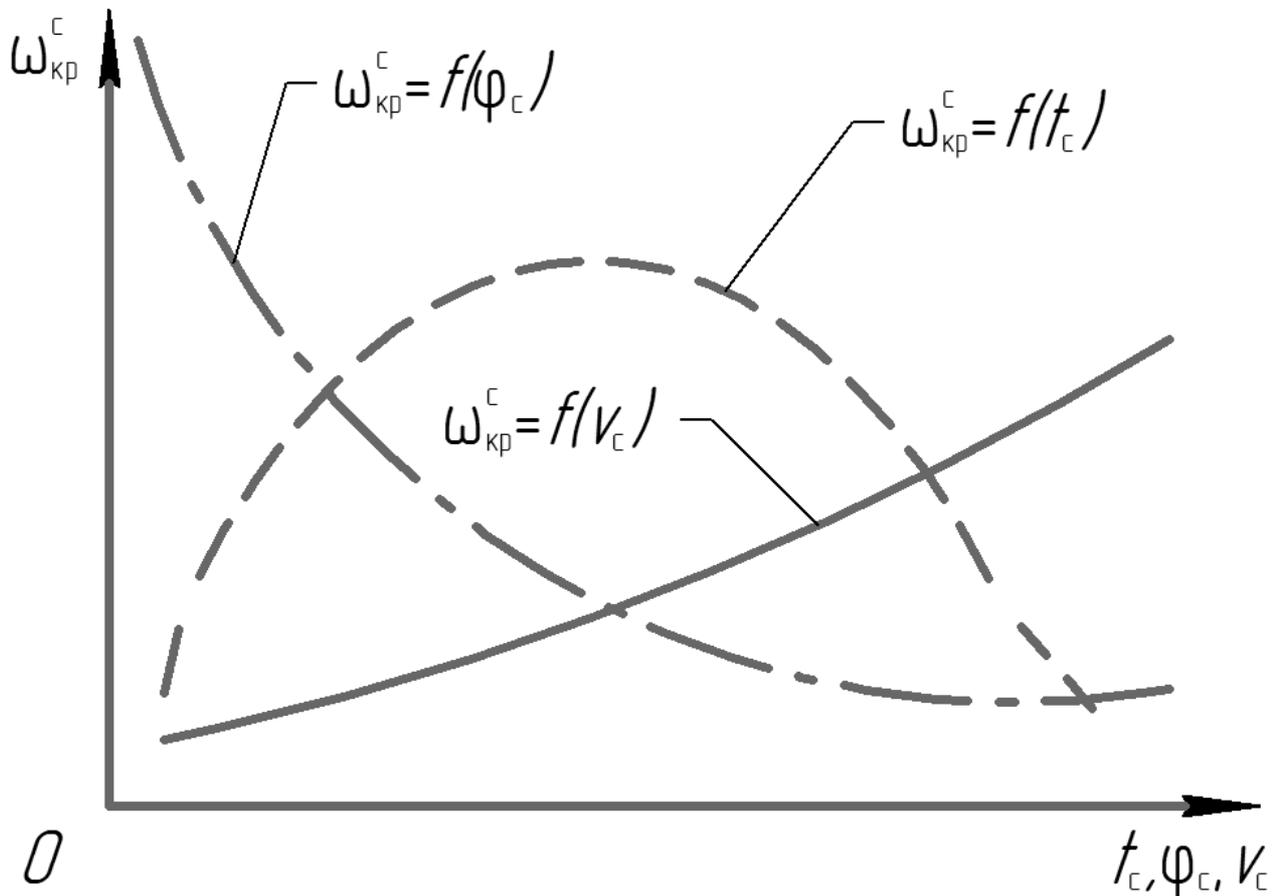


Рисунок 6 – Кривые скорости сушки наиболее распространенных групп материалов

Контрольные вопросы:

1. Что такое кривая сушки и как она связана с изменением влагосодержания материала?
2. Какие периоды выделяют по кривой сушки? Чем они характеризуются?
3. Как изменяется скорость сушки в периоде постоянной скорости и периоде падающей скорости?
4. Какие факторы влияют на форму кривых скорости сушки для различных материалов?
5. Что такое критическое влагосодержание? Как оно определяется?

5 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Состояние влажного воздуха, играющего ключевую роль во многих технологических процессах, таких как сушка, кондиционирование и вентиляция, характеризуется целым рядом взаимосвязанных параметров. Понимание этих параметров и их взаимосвязей необходимо для анализа и оптимизации соответствующих процессов. К основным параметрам влажного воздуха относятся: температура воздуха t_v ($^{\circ}\text{C}$), относительная влажность φ_v (%), скорость движения воздуха v_v (м/с), влагосодержание d (г/кг), теплосодержание (энтальпией) h , (кДж/кг) [10].

Относительная влажность (φ_v) характеризует степень насыщения воздуха водяным паром. Она показывает, насколько текущее содержание водяного пара в воздухе близко к максимально возможному при данной температуре. Количественно относительная влажность определяется как отношение давления $p_{\text{п}}$ водяного пара в ненасыщенном влажном воздухе к парциальному давлению $p_{\text{п.н.}}$ водяного пара в насыщенном влажном воздухе при той же температуре и барометрическом давлении:

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{п.н.}}} \cdot 100\% . \quad (9)$$

Влагосодержание представляет собой количество водяного пара, содержащегося в единице массы сухого воздуха, и обычно выражается в граммах водяного пара на килограмм сухого воздуха (г/кг). В отличие от относительной влажности, влагосодержание является абсолютной характеристикой количества влаги в воздухе и не зависит от температуры:

$$d = 0,622 \cdot \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} , \quad (10)$$

где B – барометрическое давление воздуха, равное сумме парциальных давлений воздуха и водяного пара.

Энтальпия или теплосодержание влажного воздуха представляет собой количество теплоты, содержащееся в единице массы влажного воздуха. Энтальпия учитывает как теплоту сухого воздуха, так и теплоту, содержащуюся в водяном паре (включая скрытую теплоту парообразования) [9]:

$$h = c_{\text{в}} \cdot t + (r + c_{\text{п}} \cdot t) \cdot d, \quad (11)$$

где $c_{\text{в}}$ – теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·К);
 $c_{\text{п}}$ – теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·К);
 r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

Для дальнейших расчетов целесообразно упростить выражение (11):

$$h = 1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot t + \left(2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 1,89 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} t \right) \cdot d = t + (2500 + 1,89t) \cdot d. \quad (12)$$

Все перечисленные параметры взаимосвязаны и влияют друг на друга. Например, изменение температуры воздуха приводит к изменению парциального давления водяного пара насыщения, что, в свою очередь, влияет на относительную влажность. При постоянном влагосодержании повышение температуры воздуха приводит к снижению относительной влажности.

В процессах сушки параметры влажного воздуха играют определяющую роль. Температура и влажность сушильного агента определяют движущую силу процесса сушки – разницу между влагосодержанием материала и влагосодержанием воздуха. Скорость движения воздуха влияет на интенсивность тепло- и массообмена на границе раздела фаз «материал – воздух».

Таким образом, для эффективного управления процессами, в которых участвует влажный воздух, необходимо учитывать все его параметры и их взаимосвязи. Правильный выбор и контроль этих параметров позволяют оптимизировать технологические процессы, обеспечивая требуемое качество продукции и минимизируя энергозатраты.

Контрольные вопросы:

1. Какие параметры характеризуют состояние влажного воздуха?
2. Как связаны относительная влажность и влагосодержание воздуха?
3. Что такое энтальпия влажного воздуха и как она рассчитывается?
4. Как температура и влажность сушильного агента влияют на процесс сушки?
5. Какие параметры влажного воздуха необходимо учитывать при оптимизации процесса сушки?

6 МАТЕРИАЛЬНЫЙ И ТЕПЛОВОЙ БАЛАНСЫ КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Конвективные сушилки на сегодняшний день занимают ведущее место среди оборудования, используемого для обезвоживания различных материалов. Их принцип действия основан на передаче тепла от горячего газообразного сушильного агента к влажному материалу, что осуществляется посредством конвекции. В этом процессе сушильный агент не только обеспечивает тепло, но и выступает в роли влагопоглотителя, унося пары влаги, образующиеся в ходе сушки. В качестве сушильного агента могут применяться различные вещества, включая воздух, топочные газы и инертные газы, такие как азот и гелий, а также перегретый водяной пар или пар растворителей. При выборе сушильного агента необходимо учитывать технологические особенности процесса. Например, для сушки пищевых продуктов использование топочных газов не рекомендуется из-за риска загрязнения. В случаях, когда пары удаляемой жидкости могут быть взрывоопасными, целесообразно применять инертные сушильные агенты [9]. Краткая характеристика различных видов сушильных агентов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Краткая характеристика различных видов сушильных агентов

Сушильный агент	Область применения	Рекомендуемая температура нагрева, °С
Воздух	Наиболее широко используемый сушильный агент. Применим, если сушимый материал не ухудшает свои свойства в присутствии кислорода и не подвержен разложению при высоких температурах	до 500 °С – в теплообменниках из жаропрочной стали; до 1000 °С – регенеративных теплообменниках
Топочные газы	Применяют при сушке термостойких материалов, не изменяющих качественные показатели при соприкосновении с продуктами горения.	250-1200°С
Азот, гелий	Используется, когда нежелателен контакт сушимого материала или паров удаляемой влаги с кислородом	около 400 °С
Перегретый водяной пар	Используют для сушки капиллярно-пористых материалов	от 180 °С

Проектирование сушильных установок требует составления материального и теплового балансов. Эти балансы позволяют определить расход сушильного агента и тепла, оценить тепловую экономичность установки и изменения параметров сушильного агента. Результаты таких расчетов в сочетании

с кинетическими характеристиками процесса сушки служат основой для конструктивного проектирования установки и ее отдельных элементов. Таким образом, конвективные сушилки представляют собой эффективное решение для обезвоживания материалов благодаря своей способности обеспечивать равномерное распределение температуры и влаги в процессе сушки. Это делает их незаменимыми в различных отраслях, включая химическую, пищевую, деревообрабатывающую промышленность и др. [11].

Рассмотрим простейшую конвективную сушильную установку (рисунок 7), в которой сушильный агент нагнетается вентилятором, водяным паром нагревается в калорифере, однократно используется для сушки материала в сушилке и выбрасывается в окружающую среду. Влажный материал транспортером подается в сушилку, высушивается при контакте с сушильным агентом (продувание через слой) и выводится из установки. Установка работает непрерывно в стационарном режиме.

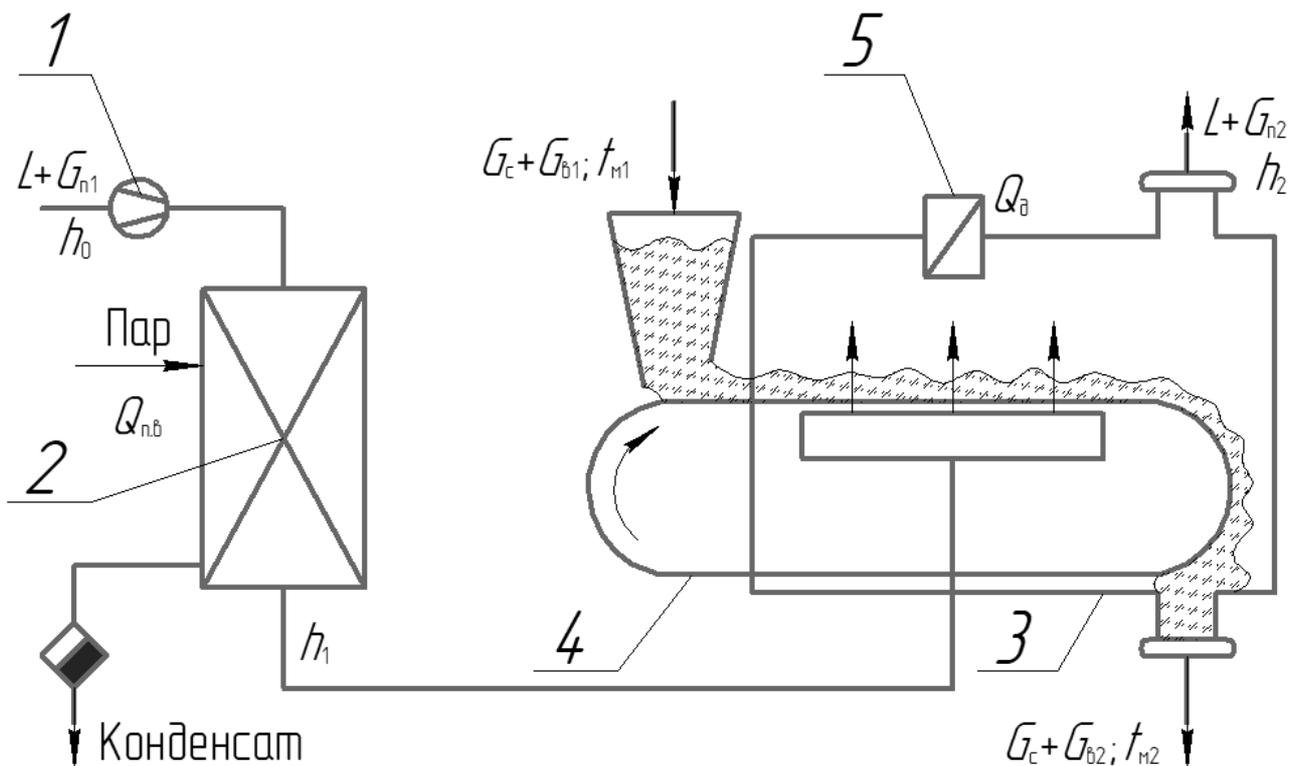


Рисунок 7 – Принципиальная схема непрерывно действующей конвективной сушилки

Материальный баланс.

Принимаем, что сушимый материал и сушильный агент состоят из абсолютно сухой части и влаги (в виде жидкости в материале, пара в сушильном агенте):

$$G_M = G_c + G_B, \quad (13)$$

где G_M – расход материала, кг/ч;
 G_c – расход сухого материала, кг/ч;
 G_B – количество воды, кг/ч;

$$G_{c.a} = L_c + G_{п}, \quad (14)$$

где $G_{c.a}$ – расход сушильного агента, кг/ч;
 L_c – количество воздуха, кг/ч;
 $G_{п}$ – расход пара, кг/ч;

Поскольку вся влага, испаренная из материала, уносится сушильным агентов, материальный баланс установки имеет вид:

$$L_c + G_{п1} + G_c + G_{B1} = L_c + G_{п2} + G_c + G_{B2}. \quad (15)$$

Индексы 1 и 2 относятся к параметрам соответственно на входе в сушилку и на выходе из нее. Будем полагать, что в сушилке массы абсолютно сухой части материала и сушильного агента не изменяются, т.е. $L_c = \text{const}$ и $G_c = \text{const}$. Поэтому материальный баланс для системы «влажный материал – сушильный агент» следует записывать только применительно к переносимому компоненту – влаге [12]. Количество влаги в сушильном агенте на входе $G_{п2}$ возрастает, причем:

$$G_{п1} + G_{B1} = G_{п2} + G_{B2}; \quad (16)$$

или

$$W = G_{B1} - G_{B2} = G_{п2} - G_{п1}, \quad (17)$$

где W – количество выделяемой материалом влаги, кг/с.

С учетом определения понятий влагосодержания сушильного агента d (кг влаги / кг сухого воздуха), и материала, ω^c (%), окончательный материальный баланс сушилки примет вид:

$$G_c \cdot \left(\frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100} \right) = L \cdot (d_2 - d_1). \quad (18)$$

Левая и правая части уравнения (18) выражают количество испаренной влаги W . Таким образом, W можно вычислить, если известны:

- а) количество L , начальное d_1 и конечное d_2 влагосодержания сушильного агента:

$$W = L \cdot (d_2 - d_1); \quad (19)$$

- б) любые три из четырех характеристик сушеного материала: начальное ω_1^c и конечное ω_2^c влагосодержания материала, его исходная G_1 и конечная G_2 массы:

$$W = G_1 \cdot \left(\frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100 + \omega_1^c} \right) = G_2 \cdot \left(\frac{\omega_1^c - \omega_2^c}{100 + \omega_2^c} \right). \quad (20)$$

Можно определить W по двум характеристикам – G_1 и G_2 .

Удельный (на 1 кг испаренной влаги) расход сухого сушильного агента определяется как:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{d_2 - d_1}. \quad (21)$$

При проектировании сушилки, в том числе при выборе вспомогательного оборудования и соединительных трубопроводов, следует помнить, что объемный расход сушильного агента V зависит от его влагосодержания:

$$V = \frac{L \cdot (1 + d)}{\rho}, \quad (22)$$

где ρ – плотность сушильного агента, рассчитываемая по формуле:

$$\rho = 0,289 \cdot \frac{p}{T} \cdot \frac{1 + d}{0,622 + d}. \quad (23)$$

Материальный баланс для непрерывно действующих сушилок составляют для потоков массы, для периодически действующих – в целом на цикл их работы.

Тепловой баланс.

Для упрощения записи теплового баланса представим сушимый материал на входе состоящим из транзитной части $G_2 = G_c + G_{в2}$ и испаряемой влаги W :

$$G_c + G_{в1} = G_2 + W. \quad (24)$$

Для сушилки, представленной на рисунке 7, приходная часть теплового баланса должна включать:

- а) теплоту, переданную сушильному агенту в калорифере:

$$Q_{п.в} = L \cdot (h_1 - h_0), \quad (25)$$

где h_1 – энтальпия сушильного агента на выходе из калорифера, кДж/кг;

h_0 – энтальпия окружающего воздуха, кДж/кг;

- б) дополнительное тепловыделение Q_d в сушилке (например, от дополнительного нагревателя или от инфракрасных излучателей);
- в) физическую теплоту, вносимую сушильным агентом $L \cdot h_0$, транзитной частью сушильного материала $G_2 \cdot c_{м1} \cdot t_{м1}$, испаряемой влагой $c_{вл} \cdot W \cdot t_{м1}$ и транспортным устройством $G_{тр} \cdot c_{тр1} \cdot t_{тр1}$.

Расходная часть теплового баланса состоит из потерь теплоты:

- с уходящим сушильным агентом $L \cdot h_2$;
- с уходящим материалом $G_2 \cdot c_{м2} \cdot t_{м2}$;
- с уходящим транспортным устройством $G_{тр} \cdot c_{тр2} \cdot t_{тр2}$;
- в окружающую среду внешней поверхностью сушилки $Q_5 = \sum k_i \cdot F_i \cdot \Delta t_i$
где k_i , F_i и Δt_i – соответственно средние коэффициент теплопередачи, площадь поверхности и разность температур на i -м участке сушилки.

Теплопередача через различные части конструкций стенок иногда существенно различается (интенсивность теплообмена горизонтальных и вертикальных участков стен неодинакова, температурный напор на разных участках различен и т.п.). Поэтому Q_5 есть сумма потерь теплоты различными

участками ограждений. При проектировании значением Q_5 задаются, а затем проверяют расчетом, добиваясь равенства заданного и расчетного значений [16]:

$$\begin{aligned} L \cdot (h_1 - h_0) &= Q_d + L \cdot h_0 + G_2 \cdot c_{m1} \cdot t_{m1} + c_{вл} \cdot W \cdot t_{m1} + G_{тр} \cdot c_{тр1} \cdot t_{тр1} = \\ &= L \cdot h_2 + G_2 \cdot c_{m2} \cdot t_{m2} + G_{тр} \cdot c_{тр2} \cdot t_{тр2} + Q_5 \end{aligned} \quad (26)$$

Если в сушилку поступает материал с частично замороженной влагой, то в расходную часть добавляют составляющую, равную расходу теплоты на подогрев льда до 0°C и превращение его в жидкость при 0°C . В приходную часть со знаком минус или плюс включается теплота химических превращений Q_x при наличии эндотермических или экзотермических реакций.

Перепишем тепловой баланс (26) в следующем виде:

$$\begin{aligned} L \cdot (h_1 - h_2) &= G_2 \cdot (c_{m2} \cdot t_{m2} - c_{m1} \cdot t_{m1}) + G_{тр} \cdot (c_{тр2} \cdot t_{тр2} - c_{тр1} \cdot t_{тр1}) - \\ &- c_{вл} \cdot W \cdot t_{m1} - Q_d + Q_5 \end{aligned} \quad (27)$$

В правой части уравнения первый член соответствует затратам теплоты на нагревание материала Q_2 , второй – на нагревание транспортных устройств $Q_{тр}$. Разделив левую и правую части выражения (27) на W , можно переписать уравнение теплового баланса в удельных величинах, отнесенных к 1 кг испаренной влаги:

$$l \cdot (h_1 - h_2) = q_m + q_{тр} + q_5 - c_{вл} \cdot t_{m1} - q_d, \quad (28)$$

где $q_m = G_2 \cdot (c_{m2} \cdot t_{m2} - c_{m1} \cdot t_{m1}) / W$;

$q_{тр} = G_{тр} \cdot (c_{тр2} \cdot t_{тр2} - c_{тр1} \cdot t_{тр1}) / W$;

$q_5 = Q_5 / W$.

Разность между суммой удельных величин дополнительных теплопритоков $\sum q_{тр} = q_d + c_{вл} \cdot t_{m1}$ и суммой удельных величин теплопотерь $\sum q_{пот} = q_m + q_{тр} + q_5$ обозначим через Δ . В таком случае окончательный тепловой баланс сушилки примет вид:

$$l \cdot (h_1 - h_2) = -\Delta. \quad (29)$$

Для сушилки, условно называемой теоретической, в которой отсутствуют потери теплоты на нагревание материала, транспортных устройств, в окружающую среду и в которой нет дополнительного тепловыделения и температура входящего в нее материала равна 0°C , из выражения (26) получаем:

$$h_1 = h_2 = \text{const}, \quad (30)$$

то есть в теоретической сушилке процесс сушки происходит при постоянной энтальпии сушильного агента (адиабатный процесс).

Сделанный вывод может быть объяснен физически. Испарение влаги из материала за счет снижения температуры сушильного агента приводит к росту его влагосодержания, так что в целом его энтальпия остается неизменной. Изменение энтальпии сушильного агента за счет изменения не только температуры, но и его влагосодержания приводит к тому, что основная статья расхода теплоты в сушилке – расход теплоты на испарение влаги $Q_{\text{и}}$ – присутствует в (26) и (27) в скрытом виде.

С учетом сказанного выше, суммарный расход теплоты в сушилке может быть записан следующим образом:

$$\sum Q = Q_{\text{и}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{тр}} + Q_5 + Q_2 - Q_{\text{д}}, \quad (31)$$

где $Q_{\text{и}}$ – расход теплоты на испарение влаги, равный для воды.

$$Q_{\text{и}} = W \cdot (2500 + 1,97 \cdot t_2 - 4,19 \cdot t_{\text{м1}}), \quad (32)$$

Q_2 – потери теплоты с уходящим сушильным агентом, кДж, рассчитываемые по формуле:

$$Q_2 = L \cdot (h'_2 - h_0), \quad (33)$$

где h'_2 – энтальпия сушильного агента при температуре t_2 на выходе из сушилки и влагосодержание d_1 на входе в нее, кДж/кг.

Требуемое количество теплоты $\sum Q$ обеспечивается сушильным агентом на выходе из калорифера, т.е. $L \cdot h_1 = \sum Q$. Данное равенство позволяет рассчитать на основании теплового баланса требуемое количество сушильного агента при заданном температурном режиме сушки (t_1 и t_2):

$$L = \frac{Q_{\text{и}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{тр}} + Q_5 - Q_{\text{д}}}{c_1 \cdot t_1 - c_2 \cdot t_2}, \quad (34)$$

где c_1 и c_2 – удельные теплоемкости сушильного агента соответственно при температурах t_1 и t_2 и влагосодержании d_1 , кДж/(кг·К).

$$c_1 = c_{\text{в}} + 0,001 \cdot d_1 \cdot c_{\text{п}}, \quad (35)$$

где $c_{\text{в}}$ и $c_{\text{п}}$ – удельные теплоемкости сухого воздуха и пара при температуре t_1 , кДж/(кг·К).

При отсутствии дополнительных источников теплоты в установке ($Q_{\text{д}} = 0$) вся необходимая для сушки теплота подводится в калорифере. Поэтому удельный расход теплоты рассчитывают как:

$$q = \frac{Q_{\text{п.в}}}{W} = \frac{L \cdot (h_1 - h_0)}{W} = l \cdot (h_1 - h_0). \quad (36)$$

Расход тепла с учетом КПД калорифера или топки η равен:

$$Q = \frac{Q_{\text{п.в}}}{\eta} = \frac{L \cdot (h_1 - h_0)}{\eta} = \frac{1000 \cdot W}{\eta} \cdot \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_1}. \quad (37)$$

В расчетах принимают для топок $\eta = 0,95$, для паровых и электрических калориферов $\eta = 0,98 \dots 0,99$, для огневых калориферов в зависимости от температуры отходящих из калориферов газов $\eta = 0,6 \dots 0,7$.

При подогреве сушильного агента паром расход последнего равен:

$$D = \frac{1000 \cdot W}{\eta \cdot (d_2 - d_1)} \cdot \frac{h_1 - h_0}{h_{\text{п}} - h_{\text{к}}}, \quad (38)$$

где $h_{\text{п}}$ – энтальпия пара на входе в калорифер, кДж/кг;

$h_{\text{к}}$ – энтальпия конденсата на выходе из калорифера, кДж/кг.

Тепловой баланс сушилки позволяет определять суммарные затраты теплоты, тепловую мощность генератора теплоты, расходы сушильного агента (при заданном температурном режиме) или температуру и влагосодержание сушильного агента на выходе (при заданном расходе сушильного агента), а также тепловую экономичность сушилки q .

Составление теплового баланса, так же как и материального, для сушилок, работающих периодически, проводят на один цикл их работы. При существенном изменении температуры воздуха на входе в сушилку и выходе из нее в течение цикла работы сначала составляют тепловой баланс для отдельных промежутков времени, в течение которых эти температуры могут быть приняты неизменными, а затем суммируют приходные и расходные статьи балансов в целом за цикл работы. В этом случае помимо статей расхода теплоты, указанных при составлении теплового баланса непрерывно действующей сушилки, учитывают расход теплоты на разогрев ограждений сушилки, охлаждающихся в период ее останова. Точные расчеты потерь теплоты на разогрев ограждений и в окружающую среду необходимо выполнять с учетом нестационарности режима протекающих в них процессов [15].

Контрольные вопросы:

1. Какие сушильные агенты используются в конвективных сушилках и при каких условиях?
2. Как составляется материальный баланс для конвективной сушильной установки?
3. Какие параметры учитываются при расчете теплового баланса сушилки?
4. Что такое теоретическая сушилка? Какие условия в ней соблюдаются?
5. Как рассчитывается удельный расход теплоты в сушилке?

7 КЛАССИФИКАЦИЯ СУШИЛОК

Разнообразие материалов, подвергаемых сушке, определяет необходимость использования разных методов обработки и конструктивных решений сушильных установок. Современные виды сушильного оборудования можно систематизировать по основным признакам [6,13,14]:

По давлению в рабочем пространстве:

- атмосферные;
- вакуумные;
- под избыточным давлением.

По режиму работы:

- периодического действия;
- непрерывного действия.

По виду теплоносителя:

- воздушные;
- на дымовых или инертных газах;
- на насыщенном или перегретом паре;
- на жидких теплоносителях.

По направлению движения теплоносителя сушильного агента относительно материала:

- прямоточные;
- противоточные;
- с перекрестным током;
- реверсивные.

По характеру циркуляции сушильного агента:

- с естественной циркуляцией;
- с принудительной циркуляцией;

По способу нагревания сушильного агента:

- с паровыми воздухоподогревателями;
- с топочными устройствами;
- с электронагревателями;
- комбинированного типа.

По кратности использования сушильного агента:

- прямоточные;
- рециркуляционные.

По способу удаления влаги из сушилки:

- с отработанным сушильным агентом;
- конденсационные;

- с химическим поглощением влаги.

По способу подвода теплоты к материалу:

- конвективные;
- контактные;
- радиационные (с лучистым нагревом);
- с нагревом токами высокой частоты;
- с акустическим нагреванием;
- с ультразвуковым нагреванием.

По виду высушиваемого материала:

- для крупнодисперсных материалов;
- для тонкодисперсных материалов;
- для пылевидных материалов.

По гидродинамическому режиму:

- с плотным неподвижным слоем;
- с перемешиваемым слоем;
- со взвешенным слоем;
- с распылением в потоке сушильного агента.

По конструктивному типу:

- камерные;
- шахтные;
- ленточные;
- барабанные;
- трубчатые;
- циклонные.

Данная классификация не ограничивается перечисленными типами сушильных установок и может быть дополнена в зависимости от поставленных задач.

Контрольные вопросы:

1. Какие основные признаки классификации сушилок выделяют?
2. Какие типы сушилок различаются по режиму работы и способу нагревания сушильного агента?
3. Какие способы подвода теплоты к материалу используют в сушилках?
4. Какие конструктивные типа сушилок существуют и для каких материалов они применяются?
5. Какие гидродинамические режимы могут быть реализованы в сушильных установках?

8 ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СУШИЛОК

8.1 Расчет распылительной сушилки форсуночного типа

Задание:

Выполнить расчет распылительной сушильной установки для яичного меланжа производительностью 300 кг/ч по испаренной влаге.

Исходные данные:

Производительность установки по испаренной влаге W , кг/ч	300
Влажность материала, %:	
– начальная ω_1	75
– конечная ω_2	5
Температура теплоносителя, °С:	
– на входе в камеру, t_1	165
– на выходе из камеры, t_2	70
Температура материала, °С:	
– на входе в сушильную камеру t_{M1}	20
– на выходе из сушильной камеры t_{M2}	60
Теплоемкость высушенного продукта c_m , кДж/(кг·К)	1,9
Давление (избыточное) греющего пара, МПа	0,8
Параметры наружного воздуха:	
– температура t_0 , °С	15
– относительная влажность, φ_0 , %	83
Устройство распыливания раствора – гидравлическая форсунка	
Влагонапряженность объема камеры A_V , кг/(м ³ ч)	12,2

Расчет:

Материальный и тепловой баланс

Производительность установки по высушенному раствору:

$$G_2 = W \cdot \frac{100 - \omega_1}{\omega_2 - \omega_1} = 107,1 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Производительность установки по исходному раствору:

$$G_1 = G_2 + W = 407,1 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер:

$$d_0 = 0,622 \frac{P_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}}.$$

Энтальпия воздуха, поступающего в калорифер:

$$h_0 = (c_{p_возд} + c_{p_вп} d_0) t_0 + r d_0 = 42,67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия воздуха, выходящего из калорифера:

$$h_1 = (c_{p_возд} + c_{p_вп} d_0) t_1 + r d_0 = 197,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Тепловые потери в установке, отнесенные к 1 кг испаренной влаги:

$$\Delta = -q_{\text{м}} - q_{\text{пот}} + c_{p_воды} t_{\text{м1}} = -176,41 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где $q_{\text{м}}$ – расход теплоты на нагрев материала, кДж/кг влаги;

$q_{\text{пот}}$ – потери теплоты в окружающую среду, принятые равными 10% от расхода теплоты на испарение влаги и нагрев материала:

$$q_{\text{м}} = \frac{G_2 c_{\text{м}}}{W} (t_{\text{м1}} - t_{\text{м2}}) = 27,14 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

$$q_{\text{пот}} = 0,1(r + c_{p_вп}t_2 + q_M - c_{p_воды}t_{M1}) = 233,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Влагосодержание воздуха на выходе из сушильной камеры:

$$d_2 = \frac{h_1 - d_0\Delta - c_{p_возд}t_2}{-\Delta + c_{p_вп}t_2 + r} = 0,0501 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия воздуха на выходе из сушильной камеры:

$$h_2 = (c_{p_возд} + c_{p_вп}d_2)t_2 + rd_2 = 202,27 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Удельный расход теплоты:

$$q = \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_0} = 3948,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Общий расход теплоты:

$$Q = qW = 329 \text{ кВт}.$$

Удельный расход сухого воздуха:

$$l = \frac{1}{d_2 - d_0} = 25,5 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Общий расход сухого воздуха:

$$L = lW = 7654 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Массовый расход влажного воздуха, выходящего из сушильной камеры:

$$G = L(1,0 + d_2) = 8038 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Относительная влажность выходящего из сушильной камеры воздуха:

$$\varphi_2 = \frac{d_2 B}{p_n (d_2 + 0,622)} = 23,6\%,$$

где p_n – давление насыщенного водяного пара при температуре t_2 .

Удельный объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого воздуха на выходе из камеры:

$$v_2 = \frac{R_{\text{возд}} T_2}{B} \left(\frac{d_2}{0,622} + 1 \right) = 1,07 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Объемный расход влажного воздуха на выходе из сушильной камеры:

$$V = Lv_2 = 8200 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}.$$

Определение размеров сушильной камеры

Объем сушильной камеры:

$$V_k = \frac{W}{A_v} = 24,6 \text{ м}^3.$$

Диаметр сушильной камеры:

$$D_k = \sqrt[3]{\frac{4V_k}{\pi(1,5 \div 2,5)}}.$$

Активная высота сушильной камеры:

$$H_k = \frac{4V_k}{\pi D_k^2}.$$

При диаметре сушильной камеры 2,8 м высота ее цилиндрической части составляет 3,9 м [4].

8.2 Расчет сушилки барабанного типа

Задание:

Выполнить расчет барабанной сушилки для смеси овощей, состоящей из баклажанов, кабачков, картофеля, капусты, репчатого лука, моркови, огурцов, свеклы и томатов, производительностью 15 т/сут по входящему материалу.

Исходные данные:

Производительность установки по входящему материалу G_1 , тон/сут	15
Влажность материала, %:	
– начальная ω_1	90
– конечная ω_2	30
Температура теплоносителя, °С:	
– на входе в камеру, t_1	120
– на выходе из камеры, t_2	45
Температура материала, °С:	
– на входе в сушильную камеру t_{m1}	20
– на выходе из сушильной камеры t_{m2}	40
Теплоемкость высушенного продукта c_m , кДж/(кг·К)	3,9
Давление (избыточное) греющего пара, МПа	0,3
Параметры наружного воздуха:	
– температура t_0 , °С	15
– относительная влажность, φ_0 , %	83
Влагонапряженность объема камеры A_V , кг/(м ³ ч)	16
Система насадки – лопастная	
– коэффициент заполнения барабана насадкой β_H	0,05
– коэффициент заполнения барабана материалом β_M	0,15

Расчет

Материальный баланс

Количество сухого материала:

$$G_k = \frac{G_1}{1 + \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}} = 0,0225 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Количество испаряемой влаги:

$$W = G_1 - G_2 = 0,135 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Параметры сушильного агента (воздуха) и расход теплоты на сушку

Влагосодержание воздуха, поступающего в калорифер:

$$d_0 = 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} = 0,009 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия воздуха, поступающего в калорифер:

$$h_0 = (c_{p_возд} + c_{p_вп} d_0) t_0 + r d_0 = 37,92 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия нагретого воздуха на входе в сушилку (после калорифера):

$$h_1 = (c_{p_возд} + c_{p_вп} d_0) t_1 + r d_0 = 145,64 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Удельный расход теплоты на нагрев высушиваемого материала:

$$q_m = G_k c_m \frac{t_{2m} - t_{1m}}{W} = 13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Потери теплоты в окружающую среду, отнесенные к 1 кг испаряемой влаги, принимаются в пределах 85÷170 кДж/кг.

Принимаем потери теплоты сушилкой в окружающую среду

$$q_{\text{пот}} = 150 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение потенциала воздуха относительно испарившейся влаги:

$$\Delta = c_{p_воды} t_{1M} - (q_M + q_{\text{пот}}) = 13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия водяного пара при конечной температуре воздуха, выходящего из сушилки:

$$h_k = r + c_{p_вп} t_2 = 2585 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия влажного воздуха на выходе из сушилки:

$$h_2 = \frac{c_{p_в} t_2 \Delta + h_k (d_0 \Delta - h_1)}{\Delta - h_k} = 143,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Конечное влагосодержание воздуха на выходе из сушилки:

$$d_k = \frac{h_2 - h_1}{\Delta} + d_0 = 0,038 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Расход воздуха:

$$L = \frac{W}{d_k - d_0} = 4,65 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Расход теплоты в калорифере:

$$Q_{\text{кал}} = L(h_1 - h_0) = 501 \text{ кВт.}$$

Расход греющего пара на подогрев воздуха в калорифере:

$$G_{\text{гп}} = \frac{Q_{\text{кал}}}{r} = 0,24 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$$

где r – удельная теплота парообразования воды при $p_{\text{изб}}$.

Размеры сушильного барабана

Основные размеры барабана выбирают по нормативам и каталогам – справочникам в соответствии с объемом сушильного пространства [3,4].

Требуемый рабочий объем барабана:

$$V_6 = \frac{W}{A_v} = 30,4 \text{ м}^3.$$

Отношение длины барабана к его диаметру должно лежать в пределах $3,5 \div 7$, принимаем 4.

Диаметр барабана:

$$D_6 = \sqrt[3]{\frac{4V_k}{\pi(3,5 \div 7)}} = 2,13 \text{ м}.$$

Длина барабана:

$$L_6 = D_6 \cdot (3,5 \div 7) = 8,52 \text{ м}.$$

Принимаем типовой сушильный барабан Приложение 11.

$$D_6 = 2,2 \text{ м}$$

$$L_6 = 10 \text{ м}$$

Уточняем напряжение барабана по испарившейся влаге:

$$A_v = \frac{W}{V_6} = 12,78 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{ч}}.$$

Объемный расход влажного сушильного агента (воздуха) на выходе из барабана:

$$V = Lv_o \frac{T_0}{273,15} \left(\frac{1}{\mu_{\text{св}}} + \frac{d_k}{\mu_{\text{вод}}} \right) = 4,03 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Скорость воздуха в свободном сечении барабана:

$$w = \frac{V}{\frac{\pi}{4} D_0^2 (1 - \beta_n - \beta_m)} = 1,32 \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

Проверим допустимую скорость воздуха, исходя из условия, что частицы высушиваемого материала более $d_{\text{ч}}$ не должны уноситься потоком воздуха из барабана.

Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,575\sqrt{\text{Ar}}} = 3,05 \cdot 10^4 ,$$

где Ar – критерий Архимеда:

$$\text{Ar} = \frac{d_{\text{ч}}^3 \cdot g}{\mu^2} (\rho_{\text{сп}} (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{сп}})) = 3,09 \cdot 10^8$$

Скорость витания:

$$w_{\text{вит}} = \frac{\text{Re} \cdot \mu}{d_{\text{ч}} \rho_{\text{сп}}} = 21,8 \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

Рабочая скорость сушильного агента меньше, чем скорость свободного витания частиц.

Время сушки:

$$\tau = \frac{2\beta_m \rho_{\text{пр_нас}} (\omega_1 - \omega_2)}{A_v (200 - (\omega_1 + \omega_2))} = 6,2 \text{ ч} .$$

Объем материала, находящегося в барабане:

$$V_m = \frac{(G_1 + G_k) \tau}{2\rho_{\text{пр_нас}}} = 5,7 \text{ м}^3 .$$

Уточненный коэффициент заполнения барабана сушилки материалом:

$$\beta_m = \frac{V_m}{V_6} = 0,15.$$

Для лопастной секторной насадки $m=0,75 \div 1,0$; $k \geq 0,7$ (при прямотоке и $k \leq 2$ (при противотоке)). Принимаем $m=1$: $k=0,7$.

Угол наклона барабана принимается от $0,5$ до 6° . Принимаем $\alpha=1,7^\circ$.

Частота вращения барабана сушилки:

$$n = \frac{m \cdot k \cdot L_6}{\tau \cdot D_6 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)} = 0,29 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

Проверим расчет угла наклона барабана:

$$\alpha = \left(\frac{L_6}{D_6 \cdot 2 \cdot n \cdot \tau} + 0,007 \cdot w \right) \frac{180}{\pi} = 1,7^\circ.$$

9 ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

9.1 Рассчитать распылительную сушильную установку

В распылительную сушилку форсуночного типа производительностью по испаряемой влаге W , поступает сушимый материал влажностью ω_1 , который необходимо высушить до значения влажности ω_2 . Температура теплоносителя на входе в камеру составляет t_1 , на выходе – t_2 . Начальная температура материала – t_{M1} , на выходе из сушильной камеры – t_{M2} . Теплоемкость высушенного продукта составляет c_M . Давление греющего пара – $p_{изб}$. Температура окружающего воздуха составляет t_0 , относительная влажность – φ_0 . Влагонапряженность объема камеры составляет A_V . Рассчитать материальный и тепловой балансы сушильной установки, определить ее параметры в соответствии с заданными условиями, приведенными в Таблице 3.

Таблица 3 – Варианты индивидуальной работы 1

	Вариант					
	1	2	3	4	5	6
W , т/сут	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4
ω_1 , %	90	90	90	90	90	90
ω_2 , %	10	15	5	10	15	5
t_1 , °С	165	160	155	150	145	140
t_2 , °С	60	65	70	60	65	70
t_{M1} , °С	25	20	15	15	20	25
t_{M2} , °С	50	60	60	55	55	65
c_M , кДж/(кг·К)	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
p , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
t_0 , °С	5	5	5	5	5	5
φ_0 , %	80	80	80	80	80	80
A_V , кг/(м ³ ч)	10	6	15	8	9	10
	Вариант					
	7	8	9	10	11	12
W , т/сут	6	6,6	7,2	7,8	8,4	9
ω_1 , %	92	92	92	92	92	92
ω_2 , %	10	15	5	10	15	5
t_1 , °С	140	145	150	155	160	165
t_2 , °С	60	65	70	60	65	70
t_{M1} , °С	25	20	15	15	20	25
t_{M2} , °С	50	60	60	55	55	65
c_M , кДж/(кг·К)	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
p , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
t_0 , °С	10	10	10	10	10	10
φ_0 , %	85	85	85	85	85	85
A_V , кг/(м ³ ч)	6	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5

Таблица 3.
Окончание

	Вариант					
	13	14	15	16	17	18
W , т/сут	9	8,4	7,8	7,2	6,6	6
ω_1 , %	94	94	94	94	94	94
ω_2 , %	10	15	5	10	15	5
t_1 , °С	165	160	155	150	145	140
t_2 , °С	60	65	70	60	65	70
t_{M1} , °С	25	20	15	15	20	25
t_{M2} , °С	50	60	60	55	55	65
c_m , кДж/(кг·К)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
p , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
t_0 , °С	15	15	15	15	15	15
φ_0 , %	70	70	70	70	70	70
A_V , кг/(м ³ ч)	14,5	13,5	12,5	13,5	13,5	6
	Вариант					
	19	20	21	22	23	24
W , т/сут	5,4	4,8	4,2	3,6	3	2,4
ω_1 , %	96	96	96	96	96	96
ω_2 , %	10	15	5	10	15	5
t_1 , °С	140	145	150	155	160	165
t_2 , °С	60	65	70	60	65	70
t_{M1} , °С	25	20	15	15	20	25
t_{M2} , °С	50	60	60	55	55	65
c_m , кДж/(кг·К)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
p , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
t_0 , °С	20	20	20	20	20	20
φ_0 , %	75	75	75	75	75	75
A_V , кг/(м ³ ч)	10	9	8	7	13,5	10,4
	Вариант					
	25	26	27	28	29	30
W , т/сут	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4
ω_1 , %	98	98	98	98	98	98
ω_2 , %	10	15	5	10	15	5
t_1 , °С	165	160	155	150	145	140
t_2 , °С	60	65	70	60	65	70
t_{M1} , °С	25	20	15	15	20	25
t_{M2} , °С	50	60	60	55	55	65
c_m , кДж/(кг·К)	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
p , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
t_0 , °С	5	5	5	5	5	5
φ_0 , %	80	80	80	80	80	80
A_V , кг/(м ³ ч)	10,4	13,5	15,5	8,5	8,5	9,5

9.2 Рассчитать барабанную сушильную установку

В барабанную сушилку ежедневно поступает сушимый материал в количестве G_1 влажностью ω_1 , который необходимо высушить до значения влажности ω_2 . Температура теплоносителя на входе в камеру составляет t_1 , на выходе – t_2 . Начальная температура материала – $t_{м1}$, на выходе из сушильной камеры – $t_{м2}$. Теплоемкость высушенного продукта составляет c_m . Давление греющего пара – $p_{изб}$. Температура окружающего воздуха составляет t_0 , относительная влажность – φ . Влагонапряженность объема камеры составляет A_V . Рассчитать материальный и тепловой баланс сушильной установки, определить ее параметры, проверить коэффициент заполнения барабана и определить время сушки в соответствии с заданными условиями, приведенными в Таблице 4.

Таблица 4 – Варианты индивидуальной работы 2

	Вариант					
	1	2	3	4	5	6
W , т/сут	10	15	20	25	20	15
ω_1 , %	45	55	60	47	48	46
ω_2 , %	35	35	35	38	38	38
Материал	дуб (опилки)	осина (опилки)	сосна (опилки)	торф фрезерный	торф фрезерный	торф фрезерный
t_1 , °С	140	120	150	135	170	140
t_2 , °С	70	70	100	70	100	70
$t_{м1}$, °С	20	10	15	10	20	15
$t_{м2}$, °С	65	50	90	60	90	60
p , МПа	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
t_0 , °С	20	10	15	10	20	15
φ_0 , %	65	75	70	80	55	75
A_V , кг/(м ³ ч)	13,61	12	10,25	22,3	19,9	11,9
Отношение длины к диаметру барабана, L/D	6	5	5	5	5	5

Значения плотности материала и насыпной плотности приведены в Приложении 3.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1
Соотношение между различными единицами давления [19]

Наименование единицы	Па	бар	мм рт. ст.	мм вод. ст.	кгс/см²	lbf/in²
Паскаль	1	10^{-5}	$7,502 \cdot 10^{-3}$	0,102	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,45 \cdot 10^{-4}$
Бар	10^5	1	$7,502 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^4$	1,02	14,5
Миллиметр ртутного столба	133,3	$1,333 \cdot 10^{-3}$	1	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,934 \cdot 10^{-3}$
Миллиметр водяного столба	9,8067	$9,8067 \cdot 10^{-5}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$	1	10^{-4}	$1,422 \cdot 10^{-3}$
Килограмм-сила на квадратный сантиметр	$9,8067 \cdot 10^4$	0,98067	$7,36 \cdot 10^2$	10^4	1	14,22
Фунт-сила на квадратный дюйм	$6,9948 \cdot 10^3$	$6,8948 \cdot 10^{-2}$	52,2	$7,0307 \cdot 10^2$	$7,0307 \cdot 10^{-2}$	1

Приложение 2
Характеристики пищевых продуктов, подвергаемых сушке [20]

Материалы	t , °С	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	c , кДж/(кг·К)	$a \cdot 10^6$, м ² /с
Баклажаны ($W=91,7\%$)	60	1032	0,37	3,96	0,119
Вишни ($W=70,8\%$)	–	1070	0,57	3,37	0,158
Говядина ($W=74,5\%$):					
– тощая	–	970 – 990	0,56	3,18	0,180
– средней упитанности	30	1050	0,49	2,92	0,158
– жирная	30	960 – 980	0,45	2,51	0,187
Кабачки ($W=94,4\%$)	–	1021	0,60	4,04	0,142
Картофель ($W=81,2\%$)	60	1076	0,61	3,66	0,163
Капуста белокочанная ($W=91,2\%$)	60	1034	0,99 – 1,3	3,95	0,361
Куриное мясо	–	1030	0,41	3,31	0,124
Лук репчатый ($W=85,6\%$)	60	1057	0,47	3,74	0,131
Масло сливочное	275	949	0,188	4,63	–
Молоко сухое:	293	940	0,232	4,87	–
– обычной сушки	–	600	0,16	2,093	0,131
– распылительной сушки	–	659	0,19	1,926	0,150
Морковь ($W=90,5\%$)	60	1037	0,62	3,93	0,165
Огурцы ($W=96\%$)	60	1015	0,44	4,086	0,114
Сахарный песок	0	1600	0,582	1,26	0,278
Свекла ($W=86,7\%$)	60	1052	0,62	3,80	0,166
Свинина ($W=78,5\%$)	–	940 – 960	0,41	2,18	0,198
Судак ($W=76\div 79\%$)	273 – 300	1045 – 1070	0,43 – 0,52	3,81	–
Сыр голландский	–	1050	0,35	2,56	0,133
Томаты ($W=94,0\%$)	60	1023	0,60	4,03	0,156
Треска ($W=78\div 83\%$)	273 – 293	1020 – 1052	0,45 – 0,55	3,43 – 3,73	–
Яблоки ($W=86,7\%$)	60	1052	0,48	3,82	0,161

Приложение 3

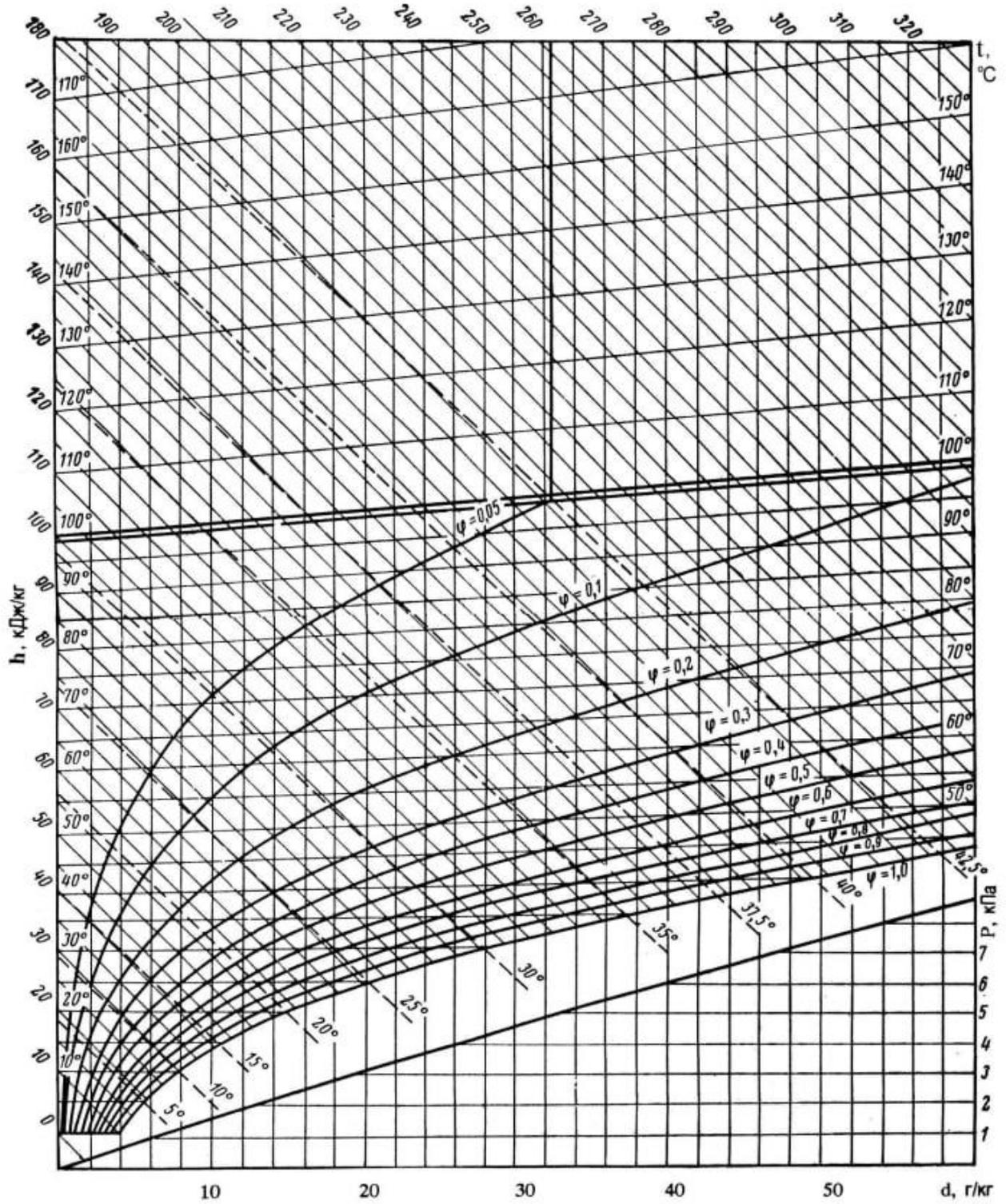
Характеристики вторичных ресурсов, подвергаемых сушке в установках барабанного типа

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Плотность насыпная, $\rho_{нас}$, кг/м ³	Теплоемкость, c , кДж/(кг·К)	Средний размер частиц, мм
Опилки			2,50	4
– Дуб	227	193		
– Акация	215	182		
– Граб	213	207		
– Ясень	210	146		
– Рябина (дерево)	204	193		
– Яблоня	202	185		
– Бук	190	174		
– Вяз	185	157		
– Лиственница	186	151		
– Клён	183	160		
– Берёза	182	143		
– Груша	188	164		
– Каштан	182	168		
– Кедр	160	157		
– Сосна	146	87		
– Липа	143	123		
– Ольха	140	132		
– Ива	137	129		
– Осина	132	129		
– Ель	126	104		
– Вербa	126	118		
– Орех лесной	120	118		
– Орех грецкий	157	137		
– Тополь	119	109		
– Пихта	115	98		
Щепа			2,45	10
– Дуб	292	248-371		
– Акация	277	234-288		
– Граб	273	266-286		
– Ясень	270	187-342		
– Рябина (дерево)	262	248-320		
– Яблоня	259	237-302		
– Бук	244	223-295		
– Вяз	238	202-295		
– Лиственница	239	194-239		

Приложение 3
Окончание

Материал	Плотность, ρ , кг/м ³	Плотность насыпная, $\rho_{нас}$, кг/м ³	Теплоемкость, c , кДж/(кг·К)	Средний размер частиц, мм
Щепа			2,45	10
– Клён	236	205-248		
– Берёза	234	184-277		
– Груша	241	211-256		
– Каштан	234	216-259		
– Кедр	205	202		
– Сосна	187	112		
– Липа	184	158		
– Ольха	180	169		
– Ива	176	167		
– Осина	169	166		
– Ель	162	133		
– Вербa	162	151		
– Орех лесной	155	151		
– Орех грецкий	202	176		
– Тополь	153	140		
– Пихта	148	126		
Торф			1,76	-
– Подстилочный	320	250		7
– Компостный	350	270		5
– Фрезерный	245	190		2

Приложение 4
h-d диаграмма для высоких температур



Приложение 5
Термодинамические свойства сухого воздуха
(при атмосферном давлении 760 мм рт. ст.) [19]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м ³	$c_p,$ кДж/(кг·К)	$l \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$m \cdot 10^6,$ Па·с	$n \cdot 10^6,$ м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,06	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719

Приложение 6

**Термодинамические свойства влажного насыщенного воздуха
(при атмосферном давлении 750 мм рт. ст.) [19]**

t , °C	$p_{в.п}''$, Па	d'' , г/кг с.в	$C_{p\ в.в}''$, кДж/(кг·К)	$h_{в.в}''$, кДж/кг	$\rho_{в.в}''$, кг/м ³
-50	3,866	0,02405	1,0061	-50,24	1,562
-40	12,399	0,07713	1,0061	-40,05	1,495
-30	37,330	0,2323	1,0064	-29,61	1,434
-20	102,925	0,6408	1,0072	-18,54	1,377
-10	259,445	1,618	1,0090	-6,04	1,324
0	610,8	3,823	1,0131	9,56	1,273
10	1227,1	7,727	1,0205	29,53	1,225
20	2336,8	14,883	1,0339	57,90	1,179
30	4241,7	27,552	1,0586	100,64	1,131
40	7374,9	49,524	1,0999	167,82	1,082
50	12335	87,519	1,1711	277,40	1,028
60	19919	154,714	1,2966	464,70	0,967
70	31161	281,558	1,5343	811,52	0,896
80	47359	559,588	2,0545	1563,83	0,810
90	70108	1458,824	3,7359	3984,72	0,705
95	84525	3397,390	7,3621	9196,16	0,644

Приложение 7

Максимально допустимые скорости сушильного агента в барабане [13]

Средний размер частиц, $d_{ч}$, мм	Значение скорости сушильного агента (м/с) при определенной плотности материала (кг/м ³)				
	$\rho_m = 350$	$\rho_m = 1000$	$\rho_m = 1400$	$\rho_m = 1800$	$\rho_m = 2200$
Менее 0,3	0,5	2,0	3,0	4,0	5,0
От 0,3 до 2	0,5 – 1,0	2,0 – 5,0	3,0 – 7,5	4,0 – 10,0	5,0 – 12,0
Более 2	1,3	5,3	8,0	10,5	13,0

Приложение 8

**Напряжение рабочего объема барабана по испаренной влаге
A, кг/(м³ч) [14]**

Температура сушильного агента на входе в барабан t_0 , °C	Влажность материала W_0 , %		
	< 10	10...40	> 40
80...150	1...8	6...15	10...20
150...250	10...20	15...40	30...50
150...400	15...30	25...60	50...75
400...650	20...40	30...90	80...120
650...1000	30...60	50...100	80...180

Приложение 9
Технические характеристики распылительных сушилок [4]

Типоразмер	Исполнение	Диаметр <i>D</i> , мм	Высота <i>H</i> , мм	Рабочий объем <i>V</i> , м ³	Производительность, кг/ч	Масса сушильной камеры не более для исполнения, кг							
						1	2,3	4,5	6				
РЦ 1,0-1,2	2, 3	1000	1500	1,2	2...10	-	380	-	-				
РФ 1,0-1,6	2	1000	2000	1,6	4...20	-	550	-	-				
РЦ 1,2-0,9	2	1200	800	0,9	2...10	-	205	-	-				
РФ 1,8-10		1800	4000	10	20...2000		1300						
РЦ 2,5-10	2	2500	2000	10	20...200	-	2500	-	-				
РЦ 2,5-15			3000	15	30...300		3000						
РФ 2,5-20	2, 3		4000	20	40...400		3400						
РФ 2,5-25			5000	25	60...600		3500						
РЦ 3,2-11	2, 4	3200	1400	14	25...250	-	2800	2300	-				
РЦ 3,2-16			2000	16	32...320		4000	3500					
РЦ 3,2-24			3000	24	48...480		5000	4500					
РЦ 3,2-30			4000	30	60...600		6000	5500					
РФ 3,2-50	2, 3	3200	6000	50	100...1000	-	4000	-	-				
РФ 3,2-65			8000	65	130...1300		5000						
РЦ 4-40	2, 4		4000	3000	40		80...800			-	7000	6000	-
РЦ 4-50				4000	50		100...1000				8000	7000	
РЦ 4-60		5000		60	120...1200	9500	8500						
РФ 4-75	2, 3, 4, 5	6000		75	150...1500	8000	7500						
РФ 4-100		8000		100	200...2000	9000	8500						
РФ 4-125		10000		125	250...2500	14500	13500						
РЦ 5-80	2, 4	5000	4000	80	160...1600	-	10000	9000	-				
РЦ 5-100			5000	100	200...2000		14000	12500					
РЦ 5-120			6000	120	240...2400		10000	14500					
РФ 5-140	2, 3, 4, 5		7000	140	280...2800		12000	11000					
РФ 5-200			10000	200	400...4000		13500	12000					
РФ 5-235			12000	235	470...4700		36000	14500					
РЦ 6,5-135	1, 2, 4	6500	4000	165	270...2700	20000	17000	16000	-				
РЦ 6,5-170			5000	170	340...3400	21500	18000	17000					
РЦ 6,5-200			6000	200	400...4000	23000	19000	18000					
РФ 6,5-330	1, 2, 3, 4, 5		10000	330	660...6600	-	19500	18000					
РФ 6,5-600			12000	400	800...8000		21000	19500					
РФ 6,5-600			18000	600	1200...12000		27000	25500					
РЦ 8-300	1, 2, 4	8000	6000	300	600...6000	25500	26000	24500	-				
РЦ 8-350			7000	350	700...7000	27000	28500	27000					
РЦ 8-400			8000	400	800...8000	28000	36000	28500					
РФ 8-600	1, 2, 3, 4, 5		12000	600	1200...12000	-	31000	30000					
РФ 8-800			10000	800	1600...16000		35000	34000					
РФ 8-1100			22000	1100	2200...22000		35000	58000		57000			

Приложение 9
Окончание

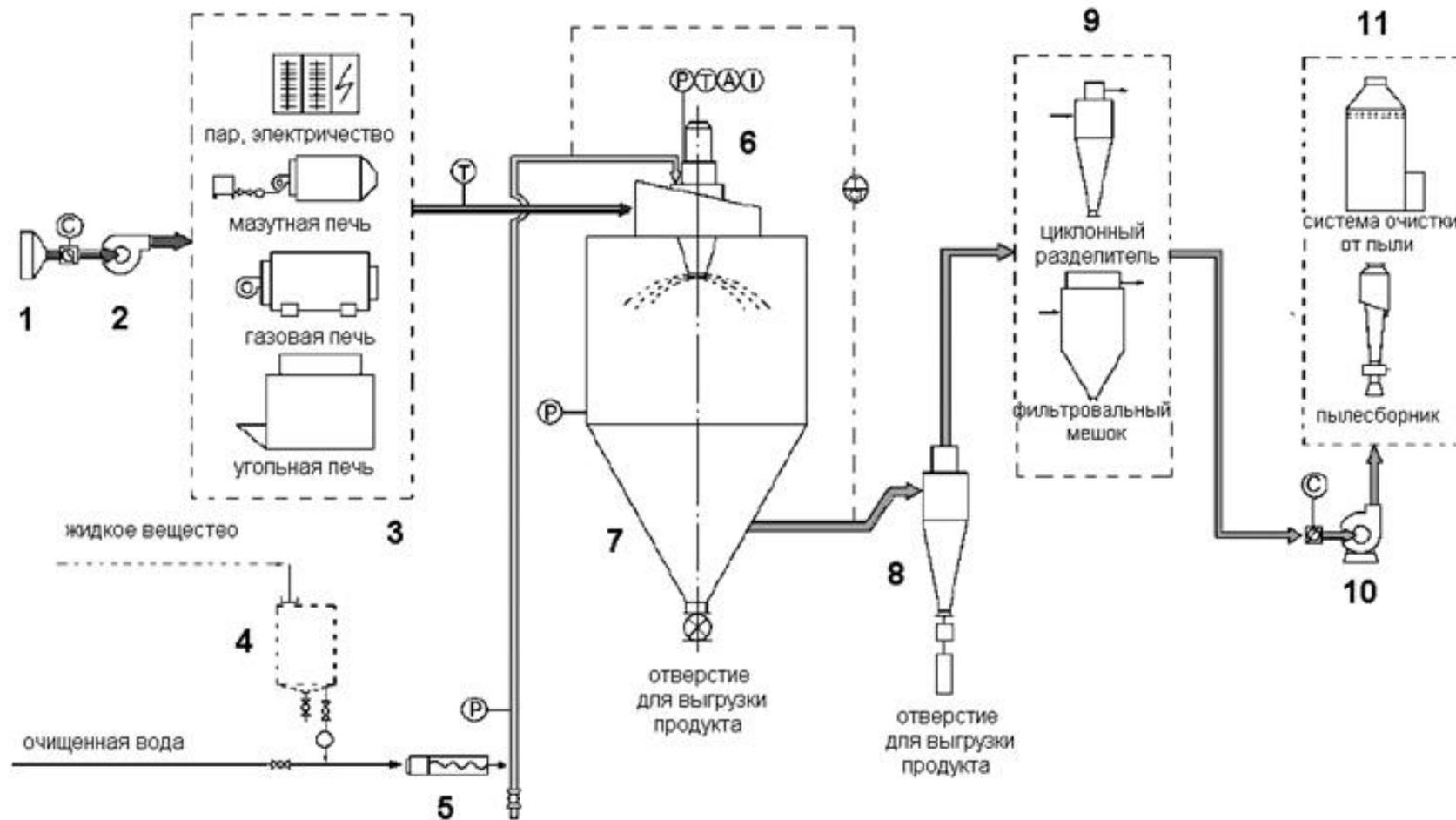
Типоразмер	Исполнение	Диаметр D , мм	Высота H , мм	Рабочий объем V , м ³	Производи- тельность, кг/ч	Масса сушильной камеры не более для исполнения, кг			
						1	2,3	4,5	6
РЦ 10-550	1, 2, 4	10000	7000	550	1100...11000	37000	40000	35800	-
РЦ 10-785			10000	785	1570...15700	45000	50000	48500	
РЦ 12,5- 1100		12500	9000	1100	2200...22000	64000	70000	67000	
РЦ 12,5- 6500			12000	1500	3000...30000	68000	80000	77000	
РЦ 15-2650	6	1500	15000	2650	50000	-	-	-	150000

*Распылительная сушилка РЦ 1,0-1,2 изготавливается с двумя распылителями: центробежным распыливающим механизмом и пневматической форсункой.

Примечания:

1. Производительность сушилки указана при влагосъеме с 1 м³ рабочего объема сушильной камеры от 2 кг/(ч· м³) и при температуре теплоносителя на выходе из сушилки 70°С до 20 кг/(ч· м³) при температуре на входе 600°С и на выходе 150°С.
2. Расчетная масса сушильных камер определена при толщине стенки камеры 3 мм и плотности стали 7850 кг/м³ с учетом массы каркаса без изоляции.
3. Рабочий объем соответствует объему цилиндрической части камеры.

Схема технологического процесса сушки с использованием распылительной сушилки

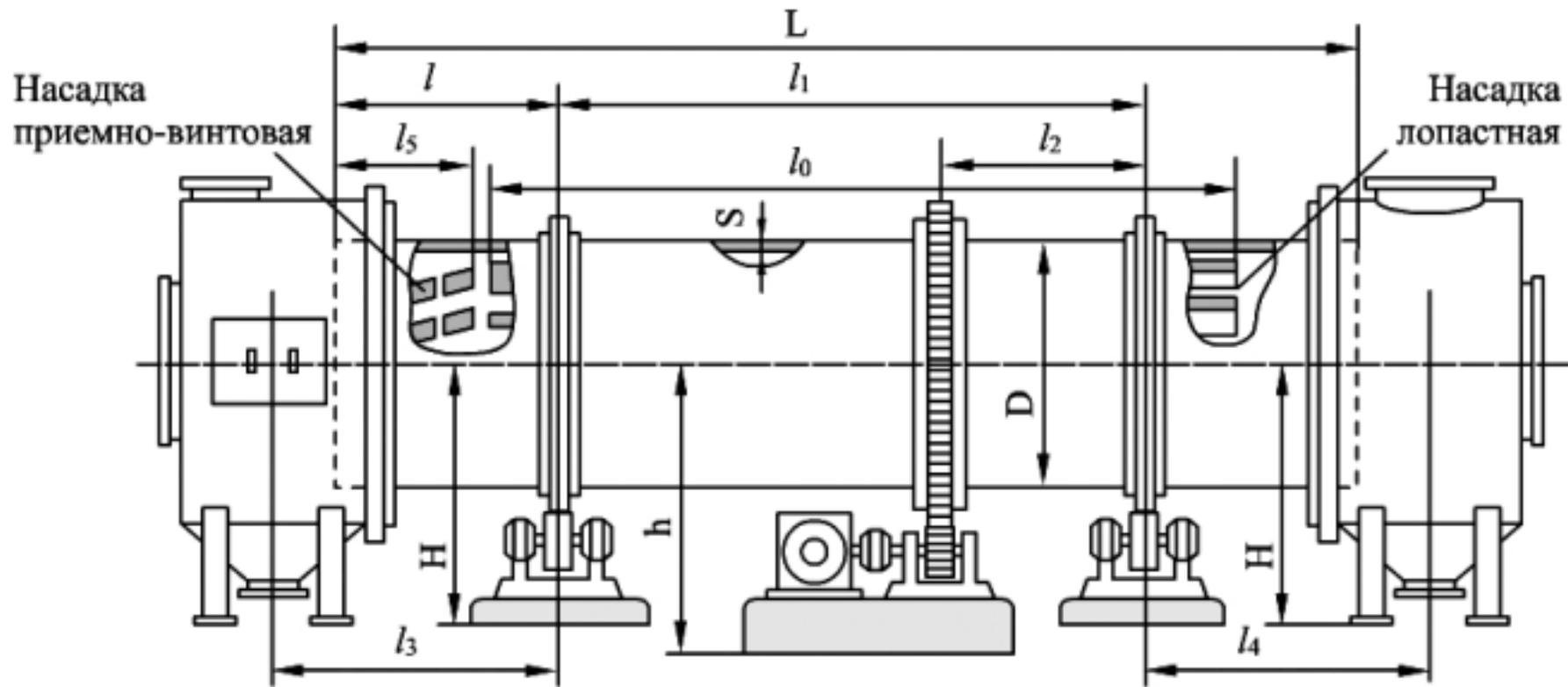


- 1 – фильтр; 2 – вентилятор; 3 – подогреватель; 4 – ёмкость с сырьем (либо штуцер подвода сырья); 5 – нагнетающий насос;
 6 – распылитель; 7 – сушильная камера; 8 – 1-й контур улавливания пыли; 9 – 2-й контур улавливания пыли; 10 – Вентилятор;
 11 – 3-й влажный контур улавливания пыли

Приложение 11
Технические характеристики барабанных сушилок [3]

85

Габариты барабана		Толщина стенки S , мм	Частота вращения, об/мин	Тип насадки	Основные размеры барабана										Число лопастей насадки
Диаметр, D , м	Длина, L , м				l_0 , м	l , м	l_1 , м	l_2 , м	l_3 , м	l_4 , м	l_5 , м	H , мм	H_1 , мм	h , мм	
1	4	5	4,06/5,06/ 8,12	Лопастная и секторальная	3	0,85	2,3	0,8	1,050	1,030	0,5	967	1120	1155	6
	6				5	1,25	3,5		1,450	1,430					
	6				5	1,25	3,5		1,475	1,430					
1,2	8	6			7	1,65	4,7	0,9	1,875	1,830	0,6	1160	1220	1275	8
	10				9	2,05	5,		2,275	2,230					
1,6	8	8			7	1,65	4,7	1,1	1,875	1,900	0,8	1453	1420	1770	12
	10		9		1,05	5,9	2,275		2,300						
	12		11		2,50	7,0	2,725		1,750						
2,0	8	10	6		1,65	4,7	1,2	1,925	1,960	1,4	1783	1620	2010	14	
	10		8		2,05	5,0		2,325	2,360						
	12		10		2,50	7,0		2,775	2,810						
2,2	10	12	9		2,05	5,9		2,325	2,375		1892	1720	2070	16	
	12		11	2,50	7,0	2,775		2,825							
	14		12	2,90	8,2	3,175		3,225							
	16		14	3,35	9,3	3,625	3,675								



Пример использования библиотеки CoolProp в пакете математических вычислений Smath Studio

▣

Версия библиотеки CoolProp

`CoolProp_get_global_param_string("version")="6.1.0"`

Получение общей информации о веществе

`HA := CoolProp_get_fluid_param_string("Ethane";`

$$HA = \begin{pmatrix} \text{"ethane, ETHANE, R170"} \\ \text{"74-84-0"} \\ \text{"A3"} \\ \text{"ETHANE"} \end{pmatrix}$$

Перечень всех поддерживаемых чистых и псевдо-чистых веществ

`Name1 := strsplit(CoolProp_get_global_param_string("fluids_list"); ",")`

`Name1 =`

$$\begin{pmatrix} \text{"1-Butene"} \\ \text{"Acetone"} \\ \text{"Air"} \\ \text{"Ammonia"} \\ \text{"Argon"} \\ \text{"Benzene"} \\ \text{"CarbonDioxide"} \\ \text{"CarbonMonoxide"} \\ \text{"CarbonylSulfide"} \\ \text{"cis-2-Butene"} \\ \text{"CycloHexane"} \\ \text{"Cyclopentane"} \\ \text{"CycloPropane"} \\ \text{"D4"} \\ \text{"D5"} \\ \text{"D6"} \\ \text{"Deuterium"} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

Перечень всех predefined смесей

`Name2 := strsplit(CoolProp_get_global_param_string("predefined_mixtures"); ",")`

`Name2 =`

$$\begin{pmatrix} \text{"Air.mix"} \\ \text{"Amarillo.mix"} \\ \text{"Ekofisk.mix"} \\ \text{"GulfCoast.mix"} \\ \text{"GulfCoastGas (NIST1).mix"} \\ \text{"HighCO2.mix"} \\ \text{"HighN2.mix"} \\ \text{"NaturalGasSample.mix"} \\ \text{"R401A.mix"} \\ \text{"R401B.mix"} \\ \text{"R401C.mix"} \\ \text{"R402A.mix"} \\ \text{"R402B.mix"} \\ \text{"R403A.mix"} \\ \text{"R403B.mix"} \\ \text{"R404A.mix"} \\ \text{"R405A.mix"} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

Приложение 12 Продолжение

Свойства определенной смеси

```
mix := "HEOS::Nitrogen[0.7812]&Oxygen[0.2096]&Argon[0.0092]" = 6,826  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$ 
CoolProp_Props("S"; "P"; 1 atm; "T"; 15 °C; mix)
```

Константы вещества

```
CoolProp_Props1("Oxygen"; "Tcrit")=154,581 K
```

Определение фазы вещества

```
CoolProp_Phase("T"; 20 °C; "P"; 1 atm; "Benzene")="liquid"
```

```
CoolProp_Phase("T"; 20 °C; "P"; 1 atm; "Ammonia")="gas"
```

```
CoolProp_Phase("T"; (-5) °C; "P"; 1 atm; "Water")="" Just FYI :) Filed upstream as #1098
```

Определение параметра вещества

```
CoolProp_Props("H"; "T"; 20 °C; "P"; 1 atm; "Water")=84,0073  $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ 
```

Попытка использовать недопустимый параметр

```
CoolProp_Props("Invalid"; "T"; 20 °C; "P"; 1 atm; "Water")=■
```

Получение последней строки ошибки

```
CoolProp_get_global_param_string("errstring")=""
```

Выполнение вычисления, которое задает предупреждение

```
CoolProp_Props("V"; "T"; 0 °C; "P"; 1 atm; "Air.mix")=1,7164·10-5 с Па
```

Получение последней строки предупреждения

```
CoolProp_get_global_param_string("warnstring")="Mixture model for viscosity is highly approximate"
```

Перечень параметров влажного воздуха

```
HAProps := stack (
  ( "Omega" | "Y" | "DewPoint" | "H" | "C" | "Vda"
    "HumRat" | "Z" | "D" | "Hda" | "cp" | "Vha"
    "W" | "Tdb" | "Twb" | "Hha" | "Cha" | "mu"
    "RH" | "T_db" | "T_wb" | "Entropy" | "cp_ha" | "visc"
    "RelHum" | "T" | "WetBulb" | "S" | "p" | "M"
    "R" | "Tdp" | "B" | "Sda" | "P_w" | "k"
    "psi_w" | "T_dp" | "Enthalpy" | "Sha" | "v" | "Conductivity"
    "K" )
```

Параметры влажного воздуха при

t=20 оС, p=1 атм, отн влажности 50%

```
valsHA := CoolProp_HAProps(HAProps; "T"; 20 °C; "P"; 1 atm; "R"; 0,5)
```

"Omega"	0,0073
"HumRat"	0,0073
"W"	0,0073
"RH"	0,5
"RelHum"	0,5
"R"	0,5
"psi_w"	0,0116
"Y"	0,0116
"Z"	0,9996
"Tdb"	293,15 K
"T_db"	293,15 K
"T"	293,15 K
"Tdp"	282,4244 K
"T_dp"	282,4244 K
"DewPoint"	282,4244 K
"D"	282,4244 K
"Twb"	286,9265 K
"T_wb"	286,9265 K
"WetBulb"	286,9265 K
"B"	286,9265 K

Приложение 12
Окончание

augment(*HAProps*; *vals_{HA}*) =

"Enthalpy"	38622,8389	$\frac{M}{c^2}$
"H"	38622,8389	$\frac{M}{c^2}$
"Hda"	38622,8389	$\frac{M}{c^2}$
"Hha"	38343,1754	$\frac{M}{c^2}$
"Entropy"	139,9702	$\frac{M}{K c^2}$
"S"	139,9702	$\frac{M}{K c^2}$
"Sda"	139,9702	$\frac{M}{K c^2}$
"Sha"	138,9567	$\frac{M}{K c^2}$
"C"	1012,4678	$\frac{M}{K c^2}$
"cp"	1012,4678	$\frac{M}{K c^2}$
"Cha"	1019,8524	$\frac{M}{K c^2}$
"cp_ha"	1019,8524	$\frac{M}{K c^2}$
"P"	$1,0132 \cdot 10^5$	$\frac{K \Gamma}{M c^2}$
"P_w"	1174,489	$\frac{K \Gamma}{M c^2}$
"V"	0,8399	$\frac{M}{K \Gamma^3}$
"Vda"	0,8399	$\frac{M}{K \Gamma^3}$
"Vha"	0,8338	$\frac{M}{K \Gamma^3}$
"mu"	$1,8143 \cdot 10^{-5}$	$\frac{K \Gamma}{M c^5}$
"Visc"	$1,8143 \cdot 10^{-5}$	$\frac{K \Gamma}{M c^5}$
"M"	$1,8143 \cdot 10^{-5}$	$\frac{K \Gamma}{M c^5}$
"k"	0,0259	$\frac{K \Gamma M}{K c^3}$
"Conductivity"	0,0259	$\frac{K \Gamma M}{K c^3}$
"K"	0,0259	$\frac{K \Gamma M}{K c^3}$

Пример расчета распылительной сушилки форсуночного типа с помощью SMatch Studio

Выполнить расчет распылительной сушильной установки производительностью 7200 кг/сут по испаренной влаге при следующих исходных данных:

$$W := 7200 \frac{\text{кг}}{\text{сут}} = 300 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad \text{производительность установки по испаренной влаге}$$

$$\omega_1 := 75 \% \quad \text{начальная влажность материала}$$

$$\omega_2 := 5 \% \quad \text{конечная влажность материала}$$

$$t_1 := 165 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{температура теплоносителя на входе в камеру}$$

$$t_2 := 70 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{температура теплоносителя на выходе из камеры}$$

$$t_{1M} := 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{температура материала на входе в сушильную камеру}$$

$$t_{2M} := 60 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{температура материала на выходе из сушильную камеру}$$

$$c_M := 1,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{теплоемкость высушенного продукта}$$

$$p_{\text{изб}} := 0,8 \text{ МПа} \quad \text{избыточное давление греющего пара}$$

$$t_0 := 15 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{температура наружного воздуха}$$

$$\varphi_0 := 83 \%$$

Устройство распыливания раствора – гидравлическая форсунка

влажнапряженность объема камеры (пределы от 3 до 30)

$$A_V := 12,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{ч}} \quad +$$

Материальный и тепловой баланс

производительность установки по высушенному продукту

$$G_2 := W \cdot \frac{100 \% - \omega_1}{\omega_1 - \omega_2} = 107,1 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

производительность установки по исходному раствору

$$G_1 := G_2 + W = 407,1 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

энтальпия воздуха, поступающего в калорифер

$$h_0 := \text{CoolProp_HAProps} ("H"; "T"; t_0; "P"; B; "W"; d_0) = 42,67 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия воздуха, выходящего из калорифера

$$h_1 := \text{CoolProp_HAProps} ("H"; "T"; t_1; "P"; B; "W"; d_0) = 197,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

расход теплоты на нагрев материала

$$q_M := \frac{G_2 \cdot c_M}{W} \cdot (t_{2M} - t_{1M}) = 27,14 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

коэф потерь в окружающую среду от расхода теплоты на испарение влаги и нагрев материала

$$k_{\text{пот}} := 10 \%$$

потери теплоты в окружающую среду

$$q_{\text{пот}} := k_{\text{пот}} \cdot (r + c_{p_вп} \cdot (t_2 - 273 \text{ К}) + q_M - c_{p_H2O} \cdot (t_{1M} - 273 \text{ К})) = 233,66 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

тепловые потери в установке, отнесенные к 1 кг испаренной влаги

$$\Delta := -q_M - q_{\text{пот}} + c_{p_H2O} \cdot (t_{1M} - 273 \text{ К}) = -176,41 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

влажностное содержание воздуха на выходе из сушильной камеры

$$d_2 := \frac{h_1 - d_0 \cdot \Delta - c_{p_в} \cdot (t_2 - 273 \text{ К})}{-\Delta + c_{p_вп} \cdot (t_2 - 273 \text{ К}) + r} = 0,0501$$

энтальпия воздуха на выходе из сушильной камеры

$$h_2 := \text{CoolProp_HAProps} ("H"; "T"; t_2; "P"; B; "W"; d_2) = 202,2718 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

удельный расход теплоты

$$q := \frac{h_1 - h_0}{d_2 - d_0} = 3948,51 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Общий расход теплоты

$$Q := q \cdot W = 329 \text{ кВт}$$

удельный расход сухого воздуха

$$l := \frac{1}{d_2 - d_0} = 25,51 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

общий расход сухого воздуха

$$L := l \cdot W = 7654 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

массовый расход влажного воздуха, выходящего из сушильной камеры

$$G := L \cdot (1,0 + d_2) = 8038 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

относительная влажность выходящего из сушильной камеры воздуха

$$\varphi_2 := \text{CoolProp_HAProps} ("R"; "T"; t_2; "P"; B; "W"; d_2) = 23,6 \%$$

удельный объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого на выходе из камеры

удельный объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого на выходе из камеры

$$v_{уд} := \text{CoolProp_HAProps} ("V"; "T"; t_2; "P"; B; "R"; \varphi_2) = 1,07 \frac{\text{М}^3}{\text{КГ}}$$

Объемный расход влажного воздуха на выходе из сушильной камеры

$$V_{\text{вл_возд}} := L \cdot v_{уд} = 8199,9 \frac{\text{М}^3}{\text{ч}}$$

Определение размеров сушильной камеры

влагонапряженность объема камеры

$$A_V = 12,2 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3 \text{ ч}}$$

объем сушильной камеры

$$V_K := \frac{W}{A_V} = 24,6 \text{ М}^3$$

температура влажного термометра, соответствующая состоянию теплоносителя (суш агента) на выходе

$$t_M := \text{CoolProp_HAProps} ("WetBulb"; "T"; t_2; "P"; B; "R"; \varphi_2) = 43,73 \text{ } ^\circ\text{C}$$

количество испаряемой влаги

$$\Delta W := (\omega_1 - \omega_2) \cdot W = 210 \frac{\text{КГ}}{\text{ч}}$$

функция определения минимального/максимального диаметра сушильной камеры

$$f_{Dk}(V) := \left[3 \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot 1,5}} \text{ } "/" \text{ } 3 \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot 2,5}} \right]$$

минимальный/максимальный диаметр сушильной камеры

$$D_k := f_{Dk}(V_K) = [2,7533 \text{ М } "/" \text{ } 2,3223 \text{ М}]$$

функция определения максимального/минимального значения активной высоты сушильной камеры, в зависимости от диаметра сушики

$$f_{Hk}(D) := \left[\frac{4 \cdot V_K}{\pi \cdot D_1^2} \text{ } "/" \text{ } \frac{4 \cdot V_K}{\pi \cdot D_3^2} \right]$$

минимальное/максимальное значения активной высоты сушильной камеры, в зависимости от диаметра сушики

$$H_k := f_{Hk}(D_k) = [4,13 \text{ М } "/" \text{ } 5,8056 \text{ М}]$$

функция соотношения габаритных размеров сушильной камеры при дисковом распыле (Hk/Dk=0,75...1,0)

$$f_{HD}(H; D) := \left[\frac{H}{D_1} \text{ } "/" \text{ } \frac{H}{D_3} \right]$$

Проверка соотношения габаритных размеров сушильной камеры при дисковом распыле ($H_k/D_k=0,75\dots1,0$)

$$H_D := f_{HD}(H_k; D_k) = [1,5 \text{ " / " } 2,5]$$

⊖

$$\Delta W = 210 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

$$D_k = [2,7533 \text{ м " / " } 2,3223 \text{ м}]$$

$$V_k = 24,5902 \text{ м}^3$$

$$H_k = [4,13 \text{ м " / " } 5,8056 \text{ м}] \quad +$$

Предлагаемые варианты оборудования

"типоразмер"	"D, м"	"H, м"	"V, м ³ "	"Wmin/Wmax, кг/ч"
"РФ 2,5-25"	2,5	5	25	"60/600"

Приложение 14
 Пример расчета сушилки барабанного типа с помощью SMatch Studio

Рассчитать барабанную сушилку для сушки измельченных овощей нагретым в калорифере воздухом при следующих условиях:

☐ | _____

$$G_1 := 15 \frac{\text{тон}}{\text{сут}} = 0,1575 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \text{производительность сушилки по входящему материалу}$$

$$\omega_1 := 90 \quad \text{начальная влажность материала}$$

$$\omega_2 := 30 \quad \text{конечная влажность материала}$$

$$t_{1M} := 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура материала на входе в сушильную камеру}$$

$$t_{2M} := 40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура материала на выходе из сушильную камеру}$$

$$d_{\text{ч}} := 25 \text{ мм} \quad \text{максимальный размер частиц продукта, уносимый воздухом из сушилки}$$

$$\rho_{\text{пр}} := 700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{средняя плотность продукта}$$

$$\rho_{\text{пр_нас}} := 350 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad \text{насыпная плотность продукта}$$

$$c_M := 3,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} \quad \text{теплоемкость продукта}$$

$$P := 99300 \text{ Па} = 745 \text{ мм рт.ст.} \quad \text{атмосферное давление}$$

$$t_0 := 15 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура наружного воздуха}$$

$$\varphi_0 := 83 \%$$

$$t_1 := 120 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура воздуха на входе в сушилку}$$

$$t_2 := 45 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{температура воздуха на выходе из сушилки}$$

$$P_{\text{изб}} := 0,3 \text{ МПа} \quad \text{избыточное давление греющего пара}$$

$$A_V := 16 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{ ч}} \quad \text{напряжение рабочего объема барабана по испарившейся влаге (от 10 до 20 при влажности входящего материала больше 40% и температуре (теплоносителя) воздуха на входе в сушилку от 80 до 150 оС)}$$

система насадки - ЛОПАСТНАЯ

коэф заполнения барабана насадкой

$$\beta_H := 0,05$$

коэф заполнения барабана материалом

$$\beta_M := 0,15$$

Материальный баланс

$$G_k := \frac{G_1}{1 + \frac{\omega_1 - \omega_2}{100 - \omega_1}} = 0,0225 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \text{количество сухого материала (продукта)}$$

$$W := G_1 - G_k = 0,135 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad \text{количество испаряемой влаги}$$

Определение параметров сушильного агента (воздуха) и расход теплоты на сушку

влажностное содержание воздуха, поступающего в калорифер

$$d_0 := \text{CoolProp_HAProps}("W"; "T"; t_0; "P"; B; "R"; \varphi_0) = 0,009 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

энтальпия наружного воздуха

$$h_0 := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; t_0; "P"; B; "R"; \varphi_0) = 37,92 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия нагретого воздуха, на входе в сушилку (после калорифера)

$$h_1 := (c_{p_в} + c_{p_вл} \cdot d_0) \cdot (t_1 - T_0) + r \cdot d_0 = 144,63 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия нагретого воздуха, на входе в сушилку (после калорифера)

$$h_1 := \text{CoolProp_HAProps}("H"; "T"; t_1; "P"; B; "W"; d_0) = 145,64 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

удельный расход теплоты на нагрев высушиваемого материала

$$q_M := G_k \cdot c_M \cdot \frac{t_{2M} - t_{1M}}{W} = 13 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

потери теплоты сушилкой в окружающую среду отнесенные к 1 кг массы испаряемой влаги принимаются в пределах 85-170 кДж/кг

Принимаем потери теплоты сушилкой в окружающую среду отнесенные к 1 кг массы испаряемой влаги

$$q_{\text{пот}} := 150 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

изменение потенциала воздуха относительно испарившейся влаги

$$\Delta := c_{p_H2O} \cdot (t_{1M} - T_0) - (q_M + q_{\text{пот}}) = -79,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия пара при конечной температуре воздуха, выходящего из сушилки

$$h_k := r + c_{p_вл} \cdot (t_2 - T_0) = 2585,05 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

энтальпия влажного воздуха на выходе из сушилки

$$h_2 := \frac{c_{p_в} \cdot (t_2 - T_0) \cdot \Delta + h_k \cdot (d_0 \cdot \Delta - h_1)}{\Delta - h_k} = 143,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

конечное влажностное содержание воздуха на выходе из сушилки

$$d_k := \frac{h_2 - h_1}{\Delta} + d_0 = 0,038 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Расход воздуха

$$L := \frac{W}{d_k - d_0} = 4,65 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

расход теплоты в калорифере

$$Q_{\text{кал}} := L \cdot (h_1 - h_0) = 501,25 \text{ кВт}$$

уд теплота парообразования при ризб

$$r_1 = 2133,59 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

расход греющего пара на подогрев воздуха в калорифере

$$G_{\text{ГП}} := \frac{Q_{\text{кал}}}{r_1} = 0,2349 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Определение размеров сушильного барабана

требуемый рабочий объем барабана

$$V_{\sigma} := \frac{W}{A_V} = 30,37 \text{ м}^3$$

отношение длины барабана к его диаметру должно быть $L/D=3.5-7$, принимаем

$$\frac{L}{D} = 3,5 - 7$$

принимаем L/D $k1 := 4$

объем барабана

$$V_{\sigma} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot k1 \cdot D$$

диаметр барабана

$$D_{\sigma} := 3 \sqrt{\frac{V_{\sigma}}{\frac{\pi}{4} \cdot k1}} = 2,13 \text{ м}$$

длина барабана

$$L_{\sigma} := D_{\sigma} \cdot k1 = 8,52 \text{ м}$$

$$D_{\sigma} := f_vybor(D_{\sigma}; L_{\sigma})_1 = 2,2 \text{ м}$$

$$L_{\sigma} := f_vybor(D_{\sigma}; L_{\sigma})_2 = 10 \text{ м}$$

уточняем объем выбранного барабана

$$V_{\sigma} := \frac{\pi \cdot D_{\sigma}^2}{4} \cdot L_{\sigma} = 38,01 \text{ м}^3$$

уточняем напряжение барабана по испарившейся влаге

$$A_V := \frac{W}{V_{\sigma}} = 12,78 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$$

щбъемный расход влажного сушильного агента (воздуха) на выходе из барабана

$$V := L \cdot v_0 \cdot \frac{t_0}{T_0} \cdot \left(\frac{1}{\mu_{\text{св}}} + \frac{d_k}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} \right) = 4,03 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

скорость воздуха в свободном сечении барабана

$$W := \frac{V}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{\sigma}^2 \cdot (1 - \beta_H - \beta_M)} = 1,32 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

проверим допустимую скорость воздуха, исходя из условия, что частицы высушиваемого материала более d_k не должны уноситься потоком воздуха из барабана.

плотность воздуха на выходе из сушилки

$$\rho_{\text{ср}} := \frac{1}{\text{CoolProp_HAProps}("V"; "T"; t_2; "P"; B; "R"; d_k)} = 1,08 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

коэф кинематической вязкости воздуха на выходе из сушилки

$$\mu := \text{CoolProp_HAProps}("mu"; "T"; t_2; "P"; B; "R"; d_k) = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ с Па}$$

критерий Рейнольдса

$$Re(Ar) := \frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot \sqrt{Ar}}$$

критерий Архимеда

$$Ar := \frac{d_{\text{ч}}^3 \cdot g}{2 \cdot \mu} \cdot (\rho_{\text{ср}} \cdot (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{ср}})) = 3,092 \cdot 10^8$$

скорость витания

$$W_{\text{ВИТ}} := \frac{Re(Ar) \cdot \mu}{d_{\text{ч}} \cdot \rho_{\text{ср}}} = 21,84 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

рабочая скорость сушильного агента меньше чем скорость свободного витания частиц

"верно"

время сушки

$$\tau := \frac{2 \cdot \beta_M \cdot \rho_{\text{пр_нас}} \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{A_V \cdot (200 - (\omega_1 + \omega_2))} = 6,2 \text{ ч}$$

объем материала, находящегося в барабане

$$V_M := \frac{(G_1 + G_k) \cdot \tau}{2 \cdot \rho_{\text{пр_нас}}} = 5,7 \text{ м}^3$$

время сушки

$$\tau := \frac{2 \cdot \beta_M \cdot \rho_{\text{пр_нас}} \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{A_V \cdot (200 - (\omega_1 + \omega_2))} = 6,2 \text{ ч}$$

объем материала, находящегося в барабане

$$V_M := \frac{(G_1 + G_k) \cdot \tau}{2 \cdot \rho_{\text{пр_нас}}} = 5,7 \text{ м}^3$$

уточненный коэффициент заполнения барабана сушилки материалом

$$\beta_M := \frac{V_M}{V_6} = 0,15$$

для лопастной секторной насадки m от 0,75 до 1,0 - принимаем: $m := 1$

для лопастной секторной $k \geq 0,7$ (прямоток), $k \leq 2$ (противоток) - принимаем: $k := 0,7$

угол наклона барабана принимается от 0,5 до 6 град - примем: $\alpha := 1,7^\circ$

частота вращения барабана сушилки

$$n := \frac{m \cdot k \cdot L_6}{\tau \cdot D_6 \cdot \text{tg}(\alpha)} = 0,29 \frac{1}{\text{МИН}}$$

проверим угол наклона барабана (в градусах)

$$\alpha := \left(\frac{L_6}{D_6 \cdot 2 \cdot n \cdot \tau} + 0,007 \cdot w \cdot \left(\frac{\text{М}}{\text{С}} \right)^{-1} \right) \cdot \frac{180}{\pi} = 1,7$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 24.06.1998 N 89-ФЗ (ред. от 25.12.2023) «Об отходах производства и потребления». URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/12555> (дата обращения 01.07.2024).
2. ГОСТ 30772–2001 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения: межгосударственный стандарт: введен Постановлением Госстандарта России от 28.12.2001 N 607-ст. Принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол N 19 от 24 мая 2001 г.). URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294846/4294846828.pdf> (дата обращения 20.11.2024).
3. ГОСТ 27134–86 Аппараты сушильные с вращающимися барабанами. Основные параметры и размеры: межгосударственный стандарт: введен Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 03.12.1986 г. N 3673. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294813/4294813607.pdf> (дата обращения 20.12.2024).
4. Сушильные аппараты и установки. Каталог – М.: Цинтихимнефтемаш. 1988 г, 73 с.
5. Лыков А.В. Теория сушки – М.: Энергия, 1968, 472 с.
6. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки – М.: Энергия, 1972, 382 с.
7. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. – М.: Энергоатомиздат, 1985, 320 с.
8. Флореа О., Смигельский О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии – М.: Химия, 1971, 441 с.
9. Бакластов А.М. Промышленные тепломассообменные процессы и установки – М.: Энергоатомиздат, 1986, 328 с.
10. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии – М.: Химия, 1995, 368 с.
11. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии – М.: Химия, 1991, 352 с.
12. Ганин Е.В., Антимонов С.В., Соловых С.Ю. Расчет процесса конвективной сушки – Оренбург: ОГУ, 2019, 39 с.
13. Лакомкин В.Ю., Смородин С.Н. Расчет и проектирование барабанной сушильной установки – СПб: ГТУ РП, 2012, 38 с.
14. Акулич П.В., Акулич А.В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета – Минск: Вышэйшая кола, 2019, 376 с.
15. Kays W.M., London A.L. Compact Heat Exchangers. – Krieger Publisher Co, 1998, 335 p.

16. Cengel Y.A., Cengel Y. Heat and Mass Transfer A Practical Approach – McGraw-Hill, 2007. 901 p.
17. Massoud M. Engineering Thermofluids: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer – Springer Science & Business Media, 2005. 1144 p.
18. Теплоэнергетика и теплотехника. Книга 4/4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочная серия / под общ. ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2007, 632 с.
19. Митропов В.В., Цветков О.Б. Сборник задач по технической термодинамике. – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 184 с.
20. Митропов В.В., Уваров Р.А., Сборник задач по процессам теплообмена: ч.1. – СПб: Университет ИТМО, 2024. – 82 с.

Уваров Роман Алексеевич
Митропов Владимир Викторович

**Современные системы обращения с вторичными
ресурсами: конвективная сушка**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А