



БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Б.А. Богатов  
Г.А. Куптель  
А.И. Яцковец

## ИСКУССТВЕННАЯ СУШКА ГОРНЫХ ПОРОД

*Рекомендовано Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия для студентов специальности  
«Разработка месторождений полезных ископаемых»  
учреждений, обеспечивающих получение высшего образования*

Минск 2004

УДК [662.641.047+622.974.4+662.047.0.012](075.8)

Б 73

Рецензенты:

профессор П.В. Шведовский,  
Н.В. Чумичева (Брестский государственный университет);  
канд. техн. наук, доцент В.Н. Чубуков (Белорусский  
государственный университет транспорта)

**Богатов Б.А.**

Б 73 Искусственная сушка горных пород: Учеб. пособие / Б.А. Богатов,  
Г.А. Куптель, А.И. Яцковец. – Мн.: БНТУ, 2004. – 156 с., вкл. 2.

ISBN 985-479-141-6.

В учебном пособии рассмотрены основные закономерности тепло- и массообмена в процессах сушки горных пород. Надлежащее внимание уделено термодинамике влажного газа. Приведена методика аналитического расчета сушильных установок. Показан графоаналитический тепловой расчет сушилок с помощью *Id*-диаграммы. В систематизированном виде рассмотрены разнообразные конструкции сушилок. Даны примеры расчета сушилок для горных пород. Приведены условия безопасной работы сушильных установок.

УДК [662.641.047+622.974.4+662.047.0.012](075.8)

ISBN 985-479-141-6

© Богатов Б.А., Куптель Г.А.,  
Яцковец А.И., 2004

## Введение

Сушка как один из важнейших этапов технологического процесса производства приобретает все большее значение и за последние годы получила настолько широкое развитие, что выделилась как самостоятельная дисциплина.

Наука о сушке развивалась по четырем основным направлениям, которые характеризуют четыре исторически сложившихся этапа.

Первый этап – создание основ гидро- и термодинамики влажного газа. Это работы В.Е. Грум-Гржимайло (1900-1924 г.), Л.К. Рамзина (1918 г.), М.Ю. Лурье и Н.М. Михайлова. Обобщение работ указанного направления дано в книге Лурье М.Ю. "Сушильное дело" (1948 г.).

Второй этап – исследование кинетики и динамики сушки и создание теории процесса. Это работы П.С. Коссовича, Г.Н. Льюиса, Т.К. Шервуда, А.П. Филоненко, Б.А. Поснова, А.В. Лыкова и его школы (1932 г.). Основы этого направления изложены в монографии Лыкова А.В. "Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения" (1938 г.).

Третий этап развития науки о сушке связан с созданием научных основ технологии сушки, которая базируется на фундаментальных работах П.А. Ребиндера, С.М. Липатова, А.В. Думанского, М.П. Воларовича, Н.В. Чураева, Н.И. Гамаюнова, М.Ф. Казанского, В.П. Дущенко и др.

На четвертом этапе развития процесс сушки рассматривается как комплексный перенос энергии и вещества, причем для математического описания взаимообусловленных явлений переноса успешно применяются методы термодинамики необратимых процессов. Это работы А.В. Лыкова, Н.М. Михайлова, Н.В. Гамаюнова и др. Работы четвертого направления обобщены в монографии Лыкова А.В. "Теория сушки" (1950, 1968 г.), Гухмана А.А. "Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена" (1967 г.) и др.

Процессы перемещения влаги при сушке тесно переплетаются с процессами теплообмена, т.е. процесс сушки является сложным теплофизическим процессом и рассматривается в широком плане как гетерогенная реакция, обусловленная комплексом химических, физико-химических, биохимических и реологических процессов, кинетика которых наряду с кинетикой переноса энергии и вещества определяет механизм и скорость протекания процессов сушки.

Наука о сушке включает три тесно связанные между собой части:

- теорию сушки, в которой рассматриваются общие аналитические и экспериментальные закономерности процесса сушки и вскрывается механизм его протекания;

- технику сушки, включающую общие методы проведения процессов сушки в сушильных установках различных типов, а также методы расчета и проектирования этих установок;

- технологию сушки, посвященную изучению свойств материала как объекта сушки.

В различных отраслях промышленности по переработке и обогащению горных пород (бурые и каменные угли, торф, сланцы, песок, глина, известняк, доломит, мел, руды черных и цветных металлов и др.) широко применяется тепловая сушка.

Влажность бурых углей и торфа перед брикетированием не должна превышать соответственно 18-20 и 16-20 %. Такая влажность обеспечивает оптимальную прочность и плотность брикетов при снижении общих затрат энергии на прессование. Влажность коксующихся каменных углей при коксовании должна быть не более 7-9 %. Снижение влажности коксовой шихты обуславливает увеличение производительности коксовых печей, снижение расхода тепла на коксование, улучшение состояния огнеупорной кладки коксовых печей и улучшение качества кокса.

Сушка песка, известняка, глины, доломита, мела, гипсового камня и других материалов перед их размолотом снижает расход электроэнергии на помол и устраняет замазывание просеивающих, смешивающих, дробящих и транспортных устройств. Сушка этих материалов также необходима для технологической переработки сырья. Например, влажность песка для сухих строительных смесей должна быть не более 0,1 %.

Влажность различных горных пород, подвергающихся сушке, колеблется в широких пределах. На торфобрикетных заводах тепловой сушке подвергается фрезерный торф, имеющий начальную влажность 45-50 %. Бурый уголь перед брикетированием имеет влажность 50-56 %. Влажность каменного угля перед сушкой находится в пределах 15-20 %. Начальная влажность глины, поступающей на сушку, изменяется в зависимости от времени года и составляет 15-20 %.

Хлористый калий получают из калийсодержащей породы – сильвинита, представляющего собой смесь минералов сильвина хлористого калия и галита хлористого натрия с примесями нерастворимых в воде минералов – гипса, ангидрита и карбонатов магния и глинистых веществ. Сушка калийной соли применяется для снижения влажности с 5-10 % до 0,5-1 % после ее обогащения.

В предлагаемом учебном пособии показано, что сушка является одним из наиболее распространенных процессов обогащения горных пород, увеличивающих содержание сухой части. Этот процесс сопровождается нарушением различных форм связи влаги с сухим веществом. В результате сушки изменяются структурные, механические, тепловые и другие свойства материала. Горным породам присущи основные закономерности тепло- и массообмена, поэтому можно применять известные виды сушки (конвективную, контактную, радиационную и т.д.) и использовать различные конструкции сушилок. Для выбора наиболее эффективной конструкции следует произвести аналитический расчет сушильного процесса или более простой расчет с использованием Id-диаграммы. Для обеспыливания сушильных установок необходимо устанавливать аппараты газоочистки и правильно подбирать центробежный вентилятор с учетом характеристики сети. Соблюдение мер по охране труда и правил взрыво- и пожаробезопасности может полностью обеспечить нормальную эксплуатацию сушильных установок.

# 1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД

## 1.1. Сушка материалов. Способы сушки

Сушкой (в широком смысле слова) называют процесс удаления из материала жидкости, в результате чего в нем (материале) увеличивается относительное содержание сухой части. Из большинства материалов (в том числе и торфа) при сушке удаляется главным образом вода, поэтому под сушкой понимают процесс обезвоживания материала. И хотя понятие "сушка" является более общим, термины "сушка" и "обезвоживание" в данном случае идентичны.

По энергетическим затратам можно выделить два основных направления обезвоживания:

- удаление воды без изменения ее агрегатного состояния (в виде жидкости), называемое просто обезвоживанием и применяемое для сильно влажных материалов в качестве первого этапа удаления влаги;

- удаление воды с изменением ее агрегатного состояния (при фазовом превращении жидкости в пар).

Первое направление обезвоживания может быть осуществлено в основном механическими способами (дренированием, сгущением, фильтрованием, прессованием, центрифугированием и др.) или при непосредственном контакте влажного материала с веществами, имеющими более низкий потенциал переноса (контактный массообмен): смешивание влажного материала с сухим, с силикагелем, при длительном хранении разновлажностных материалов и т.п.

Второе направление связано с затратами энергии на фазовое превращение влаги. В большинстве случаев эта теплота сообщается материалу извне (кондукцией, конвекцией, радиацией и др.) для прогрева материала от поверхности внутрь или за счет энергии электрического поля токов высокой частоты для прогрева материала в массе, т.е. имеем дело с термическим обезвоживанием.

Термической сушкой называют процесс обезвоживания, основанный на испарении содержащейся в материале влаги в окружающую его газовую (воздушную) среду при нагревании сушеного материала. Среду, воспринимающую испаряемую влагу, называют сушильным агентом.

Сушка материалов может происходить естественным путем (на открытом воздухе) и искусственным (в сушилках).

Естественная сушка осуществляется за счет даровой солнечной энергии и широко используется в различных технологиях: производство фрезерного и

кусового торфа, добыча сапропеля и др. При естественной сушке материал можно высушивать только до влажности, близкой к равновесной, соответствующей параметрам окружающего воздуха. Получаемая таким способом влажность материала не всегда отвечает требованиям его последующей технологической переработки.

При искусственной сушке, производимой в сушилках различных конструкций за счет подвода тепловой энергии, материал можно высушивать до любой заданной влажности и в течение любого необходимого промежутка времени. Различают сушку следующих видов:

- **конвективную**, при которой тепло для испарения влаги передается от агента сушки высушиваемому материалу при непосредственном их соприкосновении;
- **контактную**, при которой тепло передается материалу от горячей поверхности при непосредственном ее контакте с материалом;
- **радиационную**, при которой тепло для испарения влаги передается материалу лучами от солнца, электролампы или нагретых излучающих поверхностей;
- **сублимационную**, когда сушка производится в замороженном состоянии при глубоком вакууме;
- **химическую**, когда сушка осуществляется с помощью предварительной обработки материалов в водных растворах солей;
- **с помощью токов высокой частоты**, при которой благодаря повышению температуры внутри материала влага быстро перемещается к его поверхности и испаряется в окружающую среду;
- **сушку в электромагнитных установках** (индукционная) с использованием тока промышленной частоты;
- **комбинированную**, сочетающую вышеперечисленные.

## 1.2. Энергия и формы связи воды в дисперсных системах

Применение того или иного принципа обезвоживания и метода сушки обусловлено энергией связи влаги с материалом. Если агрегатное состояние влаги не изменяется, то может удаляться только слабосвязанная влага и энергия затрачивается в основном на преодоление гидравлического сопротивления твердого скелета тела. При изменении агрегатного состояния влаги скорость сушки зависит от прочности связи влаги с материалом. В этом случае энергия затрачивается как на преодоление этой связи, так и на теплоту парообразования.

Механическое обезвоживание является более дешевым методом, чем тепловая сушка, однако при этом удаляется только слабо связанная с материалом влага.

Таким образом, обезвоживание влажных материалов является не только теплофизическим, но и технологическим процессом, в характере протекания которого решающую роль играет форма связи влаги с материалом.

В настоящее время общепризнанной является классификация форм связи воды в дисперсных системах, разработанная П.А. Ребиндером и основанная на энергии связи с материалом. Согласно этой классификации в торфе, угле и подобных материалах различают:

- химически связанную воду;
- физико-химически связанную воду;
- энтропийно связанную воду (осмотическую);
- воду механического удержания.

Энергия связи и среднее содержание воды по категориям влаги для торфа приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Категория влаги	Энергия связи, кДж/моль	Среднее содержание воды, кг/кг	
		Энергия связи, кДж/моль	Среднее содержание воды, кг/кг
Общее содержание			8,8
1. Вода механического удержания			8,8
в том числе:			
капиллярная	0,8		6,75
внутриклеточная		1,55	
иммобилизованная		0,50	
структурно-захваченная		0,71	
2. Осмотическая (энтропийно связанная)	2,0		0,49
3. Физико-химически связанная	20-60		0,16
в т.ч. моносорбированная	до 60		0,04
4. Химически связанная	40-400		

Средние содержания воды в торфе на различных стадиях производства приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2



### 1.3. Процессы обезвоживания в технологии переработки различных горных пород

В технологии переработки обводненных и значительно влажных материалов встает вопрос предварительного удаления части влаги наиболее простыми и экономичными способами, не прибегая к более дорогой термической сушке. К таким способам следует отнести: использование силы тяжести материала, дренирование, фильтрование, введение дренирующих добавок, сгущение, промораживание, применение предварительной термической обработки, использование поверхностно-активных веществ (ПАВ), центрифугирование, сублимацию, прессование.

Наиболее распространенным способом является использование силы тяжести материала для отжатия свободной и слабосвязанной влаги в специально созданных складах, навалах и т.п. (глина, песок, торф, сапропель и др.). Под действием силы тяжести влага, содержащаяся в материале, через каналы, полости, поры, капилляры выжимается к основанию и отводится по специальным лоткам или через хорошо дренированное основание площадки. По мере удаления воды фильтрующая способность объема материала уменьшается и эффект отжатия падает.

Эффект может быть продлен путем введения в материал дренирующих добавок, которые создают дополнительные искусственные водопроводящие каналы внутри обезвоживаемого образца. Известно, например, дренирование обезвоживаемого торфа сухими добавками в виде торфяного порошка, сухих опилок и других материалов.

Для сильно обводненных материалов, например сапропеля, добытого гидромеханизированным способом, применяют сгущение в отстойниках (чеках). При сгущении в отстойнике пульпа разделяется на две части: верхнюю (осветленную) и нижнюю (с более высокой концентрацией твердого вещества). Верхнюю часть сливают в водоотводящий канал. Дальнейшее обезвоживание сапропеля до влажности 70-75 % и менее можно осуществить промораживанием. Промораживание бывает естественное и искусственное. Для естественного промораживания сапрпель оставляют на зиму в отстойниках (чеках). Так как для Беларуси зимний период характеризуется частыми оттепелями, то процесс неоднократного замораживания и размораживания материала способствует нарушению однородности его структуры, созданию дополнительных полостей, каналов, благодаря чему к весенне-летнему сезону удаляется значительное количество влаги путем испарения и фильтрации через подстилающий грунт. Достоинство естественного промораживания заключается в больших объемах получаемого продукта, недостаток – в том, что процесс замораживания-размораживания носит неуправляемый и неупорядоченный характер, зависящий от погодных условий.

Для искусственного промораживания используют холодильные установки, которые работают по заданному ступенчатому циклу "замораживание-размораживание". Чем больше количество проведенных циклов и чем больше глубина промораживания, тем значительнее эффект удаления влаги. Недостаток способа - в дополнительных затратах энергии.

Практическое применение получил способ обезвоживания, основанный на изменении структуры органогенного материала путем его термической обработки с последующим отжатием воды механическим путем. Например, для торфа с исходной влажностью  $W = 75\%$  проводилась предварительная термическая обработка паром в автоклаве в течение 20-30 мин. при температуре  $t = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении 0,1 МПа. Воздействие высокой температуры приводит к необратимым физико-химическим изменениям торфа с переходом части связанной воды в свободную. Это значительно улучшает результат последующего механического обезвоживания.

Недостаток способа заключается в сложности технологического процесса.

В силу своей простоты широкое распространение получил способ искусственного обезвоживания материала механическим отжатием воды в виде ступенчатого или непрерывного прессования. При ступенчатом прессовании для обезвоживания происходит периодическое нарушение структуры материала, его дробление, перемешивание и снова прессование. Нарушение плотной

структуры у фильтрующих поверхностей приводит к улучшению условий механического обезвоживания и к увеличению водоотдачи.

Низкая эффективность применявшихся ранее установок непрерывного действия (гусеничные и вальцевые прессы) по обезвоживанию заключалась в применении высоких удельных загрузок фильтрующей поверхности. Под величиной удельной загрузки понимается количество материала, приходящегося на единицу площади фильтрующей поверхности. Другими словами, при обезвоживании, например, торфа в толстом слое наблюдается потеря влаги в прилегающих к фильтрационным поверхностям объемах, а другая часть незначительно изменяет свою влажность. В результате сжатия и обезвоживания слоев торфа, прилегающих к фильтрационным поверхностям, водопроводящие каналы резко уменьшаются, что затрудняет отвод воды из внутренних слоев.

Наиболее эффективной оказалась конструкция ленточно-кольцевого прессы, осуществляющего отжатие торфа в тонком слое при давлении прессования 2,5 МПа. Основными рабочими органами в установке непрерывного действия ленточно-кольцевого типа для механического отжатия воды из торфа являются перфорированные элементы в виде вращающегося жесткого кольца и движущейся гибкой ленты. Для обеспечения синхронности их движения предусмотрен дифференциальный механизм. Ленточно-кольцевой пресс отличается непрерывностью процесса, плавным сжатием материала в клиновом прессовом пространстве между кольцом и гибкой лентой. За счет установленных по ходу движения нажимных роликов обеспечивается дополнительная пульсирующая прессовая нагрузка на торф, что равносильно ступенчатому прессованию. Пресс обезвоживает исходный торф до влажности  $W = 75 \%$ .

## **2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ ГОРНЫХ ПОРОД**

Процессы сушки связаны с подводом к сушиму материалу тепла и отводом влаги (массы вещества). При этом тепловая сушка включает в себя связанные между собой и последовательно протекающие процессы: подвод тепла, фазовое превращение жидкости в пар и удаление образовавшегося пара от объекта сушки. К тому же при подводе теплоты в сушильную установку происходит теплообмен между отдельными ее частями и окружающей средой, т.е. происходит тепловой и массовый обмен. Отвод пара от поверхности сохнущего материала производится обычно в газообразную среду путем диффузии под

влиянием разности парциальных давлений пара у поверхности объекта сушки и в газообразной среде. При отсутствии в сушилке газообразной среды, что имеет место в вакуумных сушилках, а также при сушке перегретым паром отвод испарившейся влаги осуществляется под действием разности полных давлений пара.

Тепло- и массообмен (ТМО) – необратимый процесс переноса теплоты и массы вещества, обусловленный неоднородным полем температур и концентрацией этого вещества.

Процессы тепло- и массопереноса обычно протекают одновременно и взаимосвязанно. При их изучении применяют два метода исследований: аналитический и экспериментальный.

Наиболее достоверные данные дают эксперименты, однако их использование ограничено условиями, для которых они получены. Поэтому достаточно полное изучение процесса в конкретных сушилках связано с проведением очень большого числа экспериментов, трудоемких и дорогостоящих.

Аналитический метод исследований основан на положениях теоретической физики. Для установления количественных и качественных зависимостей используются закономерности и законы тепло- и массообмена. На основании общих законов устанавливается математическая модель в виде систем дифференциальных уравнений и ряда дополнительных условий. В результате полученные зависимости имеют общий характер и могут применяться для целого класса явлений. Для конкретных условий требуется определить коэффициенты экспериментально. Поэтому наиболее плодотворный способ – сочетание аналитического (теоретического) и экспериментального методов.

Примером такого сочетания является теория подобия, позволяющая научно обоснованно распространять результаты исследований на широкий класс подобных явлений.

Для уяснения процессов ТМО и количественной их оценки представляет интерес рассмотрение отдельных способов переноса тепловой энергии (теплопроводность, конвекция, тепловое излучение) и массы вещества (диффузия, конвективный массообмен). В реальных условиях перенос тепла и массы обычно проявляется одновременно в виде сложного тепло- и массообмена. Схематически это можно представить следующим образом:

## Способы переноса

Перенос тепловой энергии	→	Перенос массы
- теплопроводность	←	вещества
- конвекция (перенос теплоты)		- диффузия (медленное проникновение одного вещества в другое)
- тепловое излучение		- конвективный массообмен (перенос массы)

### 2.1. Теплопроводность

Теплопроводность – вид теплообмена, при котором перенос энергии в форме теплоты от более нагретых к менее нагретым телам или частям тела имеет атомно-молекулярный характер. Теплопроводность не связана с макроскопическим движением среды, а обуславливается лишь колебательным молекулярным движением. Более подвижные молекулы сталкиваются с менее подвижными и передают им избыток энергии, который они в свою очередь передают далее. Происходит обмен энергией между структурными частицами, движущимися с разными скоростями. В результате одно тело (или его часть) будет нагреваться, другое (другая) – остывать. Перенос тепла согласно второму началу термодинамики происходит от более нагретого тела к менее нагретому. Тепловой поток всегда направлен в сторону меньших температур. Для возникновения теплообмена между телами обязательным условием является наличие разности температур. Процесс теплообмена длится до тех пор, пока не выравняются температуры частей тела или соприкасающихся тел.

В чистом виде теплопроводность имеет место в сплошных твердых телах и в очень тонких слоях жидкости и газа.

В общем случае температура тела  $T$  в различных точках с координатами  $(x, y, z)$  разная и изменяется с течением времени  $\tau$ . Совокупность значений температуры во всех точках тела называется температурным полем и характеризуется функцией  $T(x, y, z, \tau)$ . Если температура изменяется только в одном направлении ( $x$  или  $y$ , или  $z$ ), то поле называется одномерным, если в двух – двумерным. В инженерных расчетах часто используют допущение об одномерности температурного поля, т.е.  $T(x, \tau)$ .

Если температура во всех точках тела не меняется с течением времени, то поле называется стационарным. Температурное поле, изменяющееся с течением времени, называется нестационарным. Стационарное поле устанавливается в результате постоянных во времени условий теплообмена.

Точки тела, имеющие в некоторый момент времени одинаковую температуру, образуют изотермическую поверхность. Изменение температуры вдоль нормали  $n$  к изотермическим поверхностям характеризуется градиентом температур:

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n}.$$

Градиент температур показывает изменение температуры тела на единице длины нормали и направлен в сторону возрастания температуры. Единица измерения градиента – градус на метр (К/м).

Основной закон распространения теплоты теплопроводностью носит название французского ученого Фурье.

Количество переносимого тепла в единицу времени прямо пропорционально градиенту температур, площади сечения, перпендикулярного к направлению теплового потока, и зависит от природы вещества (твердое тело, жидкость, газ).

Математически закон Фурье имеет вид

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF, \quad (2.1)$$

где  $dQ$  – тепловой поток, равный количеству теплоты, переносимой за единицу времени, Вт;

$dF$  – площадь, через которую переносится тепло, м<sup>2</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

$\frac{\partial t}{\partial n}$  – градиент температур, К/м.

Знак минус в законе Фурье показывает, что фактически теплота переносится в сторону, противоположную градиенту температур, т.е. в направлении уменьшения температуры тела.

Коэффициент теплопроводности зависит от природы тел и изменяется от 0,005 до 420 Вт/(м·К). Самая высокая теплопроводность у металлов. Наименьшую теплопроводность имеют газы – от 0,005 до 0,17 Вт/(м·К). Жидкости по своим теплопроводным свойствам занимают промежуточное положение между металлами и газами:

капельные жидкости  $\lambda = 0,1 - 0,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

газы  $0,005 - 0,165 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

теплоизоляционные материалы  $0,006 - 0,175 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Низкая теплопроводность изоляционных и многих строительных материалов связано с тем, что они имеют пористую структуру, причем в порах находится воздух с более низкой теплопроводностью. Коэффициенты теплопроводности газов возрастают с повышением температуры тела и незначительно – с ростом давления. Для большинства жидкостей  $\lambda$ , наоборот, падает с повышением температуры, за исключением воды. Для воды в диапазоне температур от 0 до 90 °С характерно повышение коэффициента теплопроводности от 0,55 до 0,67 Вт/(м·К). Для большинства металлов с повышением температуры  $\lambda$  уменьшается. Падает  $\lambda$  и при наличии примесей в металлах, что характерно для сплавов.

Приведем некоторые значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$  для металлов: серебро – 420; медь – 393; алюминий – 229; углеродистые стали – 46-59 Вт/(м·К). Кислород и водяной пар имеют соответственно  $\lambda = 0,025$  и  $\lambda = 0,024$  Вт/(м·К). Значение коэффициента теплопроводности для торфа зависит от влажности, плотности и ботанического состава и находится в диапазоне  $\lambda = 0,027 \dots 1,795 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Решение дифференциального уравнения теплопроводности представляет трудности. Для инженерных расчетов используют готовые решения для случаев, имеющих место на практике. Результаты приведены в виде расчетных формул, графиков, таблиц [2, 3].

Для стационарного (установившегося) режима теплообмена через плоскую протяженную стенку уравнение переноса тепла упрощается. Если на поверхностях стенки толщиной  $\delta$  температуры  $t_1$  и  $t_2$ , то тепловой поток

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} F = \lambda \frac{t_1 - t_2}{\delta} F. \quad (2.2)$$

Если обозначить  $R = \frac{\delta}{\lambda} F$ , то

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{R}, \quad (2.3)$$

где  $R$  – термическое сопротивление; оно зависит от конфигурации стенки, ее геометрических размеров и условий контакта с окружающими телами.

В случае цилиндрической стенки

$$R = \frac{1}{4\pi\lambda L_1} \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad (2.4)$$

где  $L_1$  – длина цилиндрической стенки;

$d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры соответственно цилиндра и шара.

Если стенка состоит из нескольких разнородных слоев, то суммарное термическое сопротивление

$$R = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (2.5)$$

где  $R_i$  – термическое сопротивление  $i$ -го слоя.

Таким образом, при установившемся теплообмене в условиях стационарного температурного поля расчет сводится к определению термического сопротивления  $R = \delta/(\lambda F)$  и нахождению теплового потока  $Q$ . При этом важнейшее значение имеют тепловые свойства тел, характеризующиеся коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ .

## 2.2. Конвекция. Критерии подобия

*Конвективный теплообмен* – процесс переноса тепла (точнее, передачи энергии в форме теплоты) в неравномерно нагретой жидкой, газообразной и сыпучей среде вследствие движения среды и ее теплопроводности.

Конвективный теплообмен, протекающий на границе раздела двух фаз, называется *конвективной теплопередачей*.

Конвективный теплообмен зависит от ряда факторов, связанных с перемещением масс в пространстве и частиц в среде. Среди них важное значение имеют физические свойства движущегося вещества. Все это говорит о сложности про-

цессов теплообмена в жидкой, газообразной и сыпучей средах. А ведь все горные породы представляют собой конгломерат твердого, жидкого и газообразного вещества.

В зависимости от причины, определяющей характер движения среды, конвекция может быть *свободной* и *вынужденной*. Свободное (естественное) движение (свободная конвекция) обусловлено разностью плотностей нагретых и холодных слоев среды. Холодные слои, как более тяжелые, стремятся опуститься вниз, вытеснив вверх более нагретые. Возникает беспорядочное движение, в котором сталкиваются восходящие и нисходящие потоки жидкости или газа. Процесс происходит при относительно малых скоростях.

Вынужденное движение (вынужденная конвекция) происходит вследствие действия посторонних побудителей, например насосов, вентиляторов, даже ветра, при естественной сушке. Интенсивность теплообмена вынужденной конвекцией можно изменять скоростью потока в широких пределах.

Для определения теплового потока от жидкой и газообразной сред к телу, и наоборот, применяют закон Ньютона:

$$dQ = \alpha(t_{жс} - t_c)dF, \quad (2.6)$$

где  $dQ$  – количество теплоты, переносимой в единицу времени;

$t_{ж}$  – температура среды;

$t_c$  – температура поверхности тела (стенки);

$dF$  – поверхность теплообмена;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, который характеризует интенсивность переноса тепла между поверхностью тела и окружающей средой, показывает количество тепла, передаваемое от 1 м<sup>2</sup> поверхности стенки к жидкости (или наоборот) в течение 1 с при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 градус.

$$\alpha = \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right].$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от следующих факторов:

- скорости жидкости  $v$ , ее плотности  $\rho$ , вязкости  $\mu$ ;
- тепловых свойств жидкости – удельной теплоемкости  $C_p$ , теплопроводности  $\lambda$ , коэффициента объемного расширения  $\beta$ ;

- геометрических параметров – формы и определяющих размеров стенки (для труб – их диаметр  $d'$  и длина  $L'$ ), шероховатости  $\varepsilon$  стенки.

$$\alpha = f(v, \rho, \mu, C_p, \lambda, \beta, d', L', \varepsilon). \quad (2.7)$$

Из этой зависимости видно, что кажущаяся простота уравнения Ньютона не характеризует всей сложности протекающего процесса. Теоретическое определение  $\alpha$  связано с необходимостью решения систем дифференциальных уравнений конвективного теплообмена. Аналитически ее можно решить лишь для малого числа случаев. Опытным путем определить влияние всех факторов на  $\alpha$  невозможно. В связи с этим используют метод теории подобия, который позволяет при ограниченном числе опытов получить необходимые данные для обобщенного определения  $\alpha$ .

### *2.2.1. Основы теории подобия и размерностей*

Метод подобия позволяет проводить исследования природы на моделях.

Процессы и явления подобны, если они описываются одинаковой системой уравнений и подобны условия однозначности (начальные и краевые). В условия однозначности входят геометрические свойства тел и условия их взаимодействия.

Физические процессы характеризуются не отдельными физическими и геометрическими величинами, а некоторыми безразмерными комплексами, составленными из физических величин. Такие комплексы называются критериями подобия.

В опытах по исследованию коэффициента теплообмена (теплоотдачи) вид и структура критериев подобия устанавливаются путем анализа размерностей уравнений теплопроводности, гидродинамики и по условиям однозначности. Результаты опытов при различных значениях критериев подобия обрабатываются, строятся графики зависимости одних критериев от других. Этим удается обобщить опыты для большого класса явлений.

Таким образом, явления считаются подобными, если выполняются три условия:

1) сопоставляемые процессы протекают в геометрически подобных системах (геометрически каждая подобная фигура может быть получена из другой простым умножением размеров на постоянный коэффициент);

2) физические процессы в сопоставляемых явлениях качественно одинаковы;

3) критерии подобия, являющиеся аргументами критериального уравнения, численно равны между собой.

Метод подобия основывается на преобразовании размерных физических величин, получаемых опытным путем, в безразмерные комплексы, представляющие собой математическое описание известных процессов. Эти комплексы, характеризующие отдельные процессы (движение, теплообмен, ...), называются безразмерными комплексами и им обычно присвоены имена крупных ученых, внесших большой вклад в область теплообмена и гидродинамики (обычно начальными буквами фамилий). Например, критерии Рейнольдса (Re), Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr), Эйлера (Eu), Нуссельта (Nu), Фурье (Fo) и т.д.

Критерий Рейнольдса характеризует соотношение силы инерции и силы внутреннего трения жидкости

$$Re = v \ell_1 / \nu, \quad (2.8)$$

где  $v$  – скорость потока, м/с;

$\ell_1$  – определяющий размер обтекаемого тела, м;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды, м<sup>2</sup>/с.

Обычно в самых разнообразных процессах внутри протекают противоположные процессы. Так и в процессе течения силы инерции способствуют, а силы трения препятствуют потоку. Их соотношение определяет характер течения (ламинарное при  $Re_{кр} < 2 \cdot 10^3$  в прямой круглой трубе жидкости, а при  $Re > 1 \cdot 10^3$  – турбулентное (вихревое) движение).

При ламинарном движении теплообмен между жидкостью и стенкой осуществляется молекулярным путем. При турбулентном течении возрастает роль конвективного теплообмена.

Особенность представляет выбор характерного размера  $\ell_1$ . При движении сквозь зернистый материал процесс обтекания рассматривается как внешняя задача, а движение жидкости в каналах, образуемых частицами, – как внутренняя. Поэтому иногда используют в качестве  $\ell_1$  размер частицы, а иногда – эквивалентный диаметр канала.

Для характеристики интенсивности движения жидкости или газа за счет разной плотности отдельных слоев, возникающей вследствие разности их температур, используется критерий Грасгофа:

$$\text{Gr} = \beta \frac{g \ell^3}{\nu^2} \Delta T, \quad (2.9)$$

где  $\beta$  – термический коэффициент объемного расширения среды;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;

$\Delta T$  – разность температур, для газов  $\beta = \frac{1}{T}$ .

Критерий Прандтля, характеризующий свойства среды:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a_t}, \quad (2.10)$$

где  $a_t$  – коэффициент теплопроводности газа.

Численные значения  $\text{Pr}$  зависят в основном от молекулярного состава (числа атомов) газа и незначительно – от температуры. Для одноатомных газов  $\text{Pr} = 0,67$ , двухатомных  $\text{Pr} = 0,72$ , трехатомных  $\text{Pr} = 0,8$ , для четырехатомных и более  $\text{Pr} = 1$ .

Для капельных жидкостей  $\text{Pr}$  больше единицы, а для очень вязких жидкостей достигает нескольких сотен и даже тысяч единиц. Для капельных и вязких жидкостей критерий  $\text{Pr}$  зависит от температуры.

Критерий Нуссельта характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \ell_1}{\lambda}, \quad (2.11)$$

где  $\text{Nu}$  содержит искомую величину, поэтому представляет собой не определяющий критерий, а определяемый.

Изменение температурного поля среды и тела характеризуется критерием Фурье:

$$\text{Fo} = a_t \tau / \ell_1^2, \quad (2.12)$$

где  $\tau$  – время;

$a_t$  – коэффициент температуропроводности.

Этот критерий описывает ход изменения процесса при стационарном режиме (его называют критерием гомохронности).

Между вышеуказанными критериями имеется связь

$$\text{Nu} = f(\text{Fo}, \text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}). \quad (2.13)$$

В зависимости от условий это уравнение может видоизменяться.

В стационарных условиях отсутствует  $\text{Fo}$  :

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}). \quad (2.14)$$

В условиях вынужденного перемещения среды критерий  $\text{Gr}$ , определяющий интенсивность свободного движения, оказывается несущественным:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}). \quad (2.15)$$

При использовании газов одинаковой атомности критерий  $\text{Pr}$  имеет постоянную величину:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}). \quad (2.16)$$

Указанные уравнения имеют вид степенной функции:

$$\text{Nu} = c \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^m, \quad (2.17)$$

где  $c, n, m$  – постоянные числа.

В этой форме представляется большинство опытных данных теплообмена. При изучении массообмена и теплообмена (процессы сушки) добавляются новые критерии:

- массообменный критерий  $\text{Nu}$

$$\text{Nu}' = \alpha' \cdot \ell' / \lambda', \quad (2.18)$$

где  $\alpha'$  – коэффициент массообмена,  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$ ;  $\lambda'$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{Па})$ ;

- критерий Лыкова, характеризующий инерцию тепловых полей к полям влагосодержания:

$$Lu = a_m / a_t, \quad (2.19)$$

где  $a_m$  – коэффициент влагопроводности;

$a_t$  – коэффициент температуропроводности.

При  $Lu > 1$  перенос массы вещества опережает тепловой поток.

- критерий Коссовича  $Ko$ , характеризующий влияние влаги материала на процесс его нагревания:

$$Ko = \frac{r \cdot \Delta U}{(C \cdot \Delta T)}, \quad (2.20)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования;

$\Delta U$  – перепад влагосодержания;

$C$  – удельная теплоемкость влажного материала;

$\Delta T$  – перепад температур.

$$Ko = f(U, T). \quad (2.21)$$

- критерий Поснова  $Pn$  характеризует относительный перепад влагосодержания материала:

$$Pn = \delta_m \cdot \Delta T / \Delta U, \quad (2.22)$$

где  $\delta_m$  – термоградиентный коэффициент, 1/К.

- критерий Гухмана, характеризующий влияние влагообмена на теплообмен:

$$Gu = (T_c - T_m) / T_c = \frac{\Delta T}{T_c}, \quad (2.23)$$

где  $T_c$  – температура среды по сухому термометру;

$T_m$  – то же по мокрому.

Этот критерий характеризует величину теплового потенциала влагообмена  $\Delta T$  по отношению к потенциалу теплообмена  $T_c$ .

- критерий Кирпичева, учитывающий количество влаги  $q_m$ , испарившейся с поверхности материала, по отношению к влаге, подведенной за счет теплопроводности:

$$Ki = \frac{q_m \ell_1}{a_m \rho \Delta U}. \quad (2.24)$$

Критериальные уравнения для конвективного теплообмена получены для многих задач, имеющих практическое приложение.

### 2.2.2. Теплоотдача при свободной конвекции

В случае свободного движения жидкости или газа около стенки критериальное уравнение теплообмена имеет вид

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)_m^n. \quad (2.25)$$

Индекс  $m$  указывает на то, что физические параметры отнесены к определяющей температуре  $t_m = 0,5(t_c + t_{ж})$ , где  $t_c$  – температура поверхности тела,  $t_{ж}$  – температура среды вне зоны рассматриваемого процесса.

Параметры  $c$  и  $n$  зависят от  $Gr \cdot Pr$ :

$Gr \cdot Pr$	$c$	$n$
$< 1 \cdot 10^{-3}$	0,5	0
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333

При  $(Gr \cdot Pr) < 1 \cdot 10^3$  критерий  $Nu$  постоянен и равен 0,5. Откуда коэффициент теплообмена

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell_1}{\lambda} = 0,5 \text{ и } \alpha = \frac{0,5\lambda}{\ell_1}. \quad (2.26)$$

При изменении  $(Gr \cdot Pr)$  от  $1 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^2$  наблюдается режим течения, переходный к ламинарному.

При изменении  $(Gr \cdot Pr)$  от  $2 \cdot 10^7$  до  $1 \cdot 10^{13}$  наступает турбулентный режим течения. Интенсивность теплообмена наибольшая.

Отличительной особенностью свободной конвекции является то, что интенсивность теплообмена зависит от физических свойств жидкости или газа, а также от температурного напора (разности температур стенки и среды) и очень мало – от формы тела.

### 2.2.3. Теплоотдача при вынужденной конвекции

В этом случае теплообмен описывается четырьмя критериями: Nu, Re, Gr, Pr.

В отличие от свободной при вынужденной конвекции существенное влияние оказывают форма тел, их ориентация в потоке жидкости или газа. В случае ламинарного течения при продольном обтекании жидкостью или газом стенки критериальное уравнение имеет вид

$$Nu_{\text{ж}} = 0,66 Re_{\text{ж}}^{0,5} Pr_{\text{ж}}^{0,33} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25}. \quad (2.27)$$

Индекс "ж" означает, что при выборе теплофизических свойств среды определяющей температурой является температура набегающего потока, а индекс "с" – температура стенки.

При турбулентном режиме критериальное уравнение имеет вид

$$Nu_{\text{ж}} = 0,037 Re_{\text{ж}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,43} (Pr_{\text{ж}}/Pr_{\text{с}})^{0,25}. \quad (2.28)$$

Как видим, в случае турбулентного режима движения потока влияние скорости выше.

## 2.3. Теплообмен излучением

Тепловым излучением называется процесс переноса теплоты от одного тела к другому посредством электромагнитных волн. Электромагнитные волны распространяются со скоростью света, равной  $3 \cdot 10^8$  м/с. По своей природе тепловое излучение хотя и невидимое глазом, аналогично световому и отличается от него только интервалом длин волн. Видимый спектр лежит в диапазоне 0,40-0,75 мкм, а невидимый (инфракрасное излучение) – от 0,75 до 500-1000 мкм.

Источником теплового излучения (лучистой энергии) являются внутриатомные возмущения, обусловленные столкновениями частиц при их хаотическом движении.

Величина теплового излучения зависит от температуры в большей степени, чем теплопроводность и конвекция. Поэтому при высоких температурах (например, в пневмогазовых сушилках) его доля значительно возрастает по сравнению с другими видами теплообмена.

Лучеиспускание свойственно всем телам. Они в том или ином виде непрерывно излучают тепловую энергию, которая, попадая на другие тела, может поглощаться, отражаться и проходить сквозь них. Поглощаемая телом лучистая энергия снова превращается в тепловую, а часть отраженной или прошедшей через него энергии попадает на другие тела и взаимодействует с ними. Таким образом, каждое материальное тело не только непрерывно излучает теплоту, но и непрерывно ее поглощает. В результате превращения тепловой энергии в лучистую, а затем лучистой в тепловую осуществляется процесс лучистого теплообмена.

Общее количество лучистой энергии, падающей на тело  $Q$ , будет частично поглощаться  $Q_{\text{пг}}$ , отражаться  $Q_{\text{от}}$  и проходить сквозь него  $Q_{\text{пр}}$ .

На основании закона сохранения энергии общее количество лучистой энергии

$$Q = Q_{\text{пг}} + Q_{\text{от}} + Q_{\text{пр}}. \quad (2.29)$$

Отношение  $Q_{\text{пг}}/Q = K_{\text{пг}}$  характеризует способность тела пропускать лучистую энергию и называется коэффициентом поглощения.

Отношение  $Q_{\text{от}}/Q = K_{\text{от}}$  характеризует способность тела отражать лучистую энергию и называется коэффициентом отражения.

Отношение  $Q_{\text{пр}}/Q = K_{\text{пр}}$  характеризует способность тела пропускать лучистую энергию и называется коэффициентом пропускания.

Все коэффициенты изменяются от 0 до 1, но в сумме обязательно дают 1, т.е.

$$K_{\text{пг}} + K_{\text{от}} + K_{\text{пр}} = 1. \quad (2.30)$$

Численные значения коэффициентов зависят от природы тела, его температуры, состояния поверхности и длины излучаемой волны.

Если вся падающая лучистая энергия поглощается телом, то такое тело называется абсолютно черным.

Все тела в той или иной степени способны поглощать, отражать и пропускать лучистую энергию. Из реальных тел наибольшую поглотительную способность имеет сажа и черный бархат, которые отражают 3 – 4 % падающей энергии.

Для восприятия тепловых лучей решающее значение имеет состояние поверхности (шероховатая, гладкая, полированная) и в меньшей степени цвет (белый, черный). Белая поверхность лучше отражает тепловые лучи, нежели черная. Гладкие и особенно полированные поверхности независимо от их цвета обладают во много раз большей отражательной способностью, чем шероховатые.

Чистый воздух считается прозрачным для тепловых лучей, которые полностью проходят через него, не поглощаясь и не отражаясь. При наличии пыли, водяных паров или углекислого газа воздух становится полупрозрачным.

Полное количество энергии  $E_0$ , излучаемое абсолютно черным телом в единицу времени (1 с) с единицы поверхности ( $1 \text{ м}^2$ ) во всем интервале длин волн лучистого излучения, называется интегральной излучательной способностью и определяется законом Стефана – Больцмана.

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \tag{2.31}$$

где  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – константа излучения абсолютно черного тела;

$T$  – абсолютная температура,  $T = 273 + t^\circ\text{C}$ .

Для технических расчетов запись ведут в более удобной форме:

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \tag{2.32}$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Хотя закон установлен для абсолютно черного тела, его можно применять к реальным серым телам:

$$E = C_1 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.33)$$

где  $C_1$  – коэффициент излучения серых тел;  $C_1 < C_0$  и определяется природой тела, его температурой и состоянием поверхности.

Сопоставление между собой энергии излучения серого и абсолютно черного тела при одинаковой температуре дает показатель, который называется относительной излучательной способностью или степенью черноты тела  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = C_1 / C_0 = E / E_0, \quad \varepsilon \in [0,1].$$

Зная степень черноты тела, можно определить энергию излучения:

$$E = \varepsilon E_0. \quad (2.34)$$

Передача теплоты излучением представляет собой сложный процесс многократных поглощений и отражений энергии. Тепловое излучение, отражаясь от тела, снова возвращается на первоисточник, снижая тем самым теплообмен. Количество передаваемой излучением теплоты зависит от многих факторов (прежде всего от температуры и степени черноты тела  $\varepsilon$ ), участвующих в теплообмене, а также от расстояния между ними, их формы и размеров.

Плотность лучистого теплового потока  $q$  между параллельными серыми плоскостями ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) определяется по уравнению

$$q = \varepsilon_{\text{п}} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.35)$$

где  $\varepsilon_{\text{п}}$  – приведенная степень черноты.

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1},$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – степень черноты одной и другой плоскости.

В случае лучистого теплообмена между двумя поверхностями в замкнутом пространстве, когда одна поверхность обтекает другую

$$\varepsilon_{\Pi} = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + F_1/F_2(1/\varepsilon_2 - 1)}, \quad (2.36)$$

где  $F_1, F_2$  – площадь поверхности лучеиспускающих тел.

Таким образом, для интенсификации лучистого теплообмена необходимо повысить температуру излучающего тела и увеличить степень черноты системы.

Наоборот, для защиты от теплового излучения (снижения интенсивности теплообмена излучением) устанавливают экраны, расположенные между взаимно излучающими поверхностями. В этом случае приведенная степень черноты системы тел снижается.

При наличии одного экрана количество передаваемой энергии уменьшается в 2 раза, при наличии двух – в 3 раза. Еще большего эффекта снижения передаваемой лучистой энергии можно достигнуть применением экранов с малой степенью черноты. Установка экрана со степенью черноты  $\varepsilon_s = 0,1$  между поверхностями с  $\varepsilon = 0,8$  снижает лучистый теплообмен в 14 раз.

В отличие от теплового излучения твердых и жидких тел, происходящего в поверхностном слое, излучение газов носит объемный характер, так как в нем участвуют все молекулы объема газа. Твердые тела излучают тепловую энергию во всем интервале длин волн, а излучение газов носит избирательный, селективный характер. Газы излучают и поглощают энергию в определенном узком диапазоне частот, а одно- и двухатомные газы, например кислород  $O_2$ , азот  $N_2$ , водород  $H_2$ , угарный газ  $CO$ , считаются практически прозрачными для теплового излучения.

При прохождении теплового потока через многоатомные газы, например водяной пар  $H_2O$ , углекислый газ  $CO_2$ , аммиак  $NH_3$ , энергия за счет частичного поглощения уменьшается. Потери зависят от плотности газов, т.е. от количества молекул на пути прохождения потока.

## 2.4. Сложный теплообмен

Различные способы передачи тепла в реальных процессах часто осуществляются одновременно, создавая тем самым сложный теплообмен. Расчет сложного теплообмена практически невозможен без упрощений и допущений. Обычно теплообмен рассчитывается по одному (главному) способу теплообмена, а другими пренебрегают или условно учитывают коэффициентами. Например, в пористом теле теплота распространяется теплопроводностью, а влияние конвекции и теплового излучения учитывается увеличением коэффициента теплопроводности. У капельных, практически непрозрачных жидкостей, тепловое излучение отсутствует. За основу берут конвекцию.

В глубоком вакууме теплообмен между телами возможен только за счет излучения. Поэтому в каждом конкретном случае учитывается главный способ передачи тепла. Это и принимается во внимание при конструировании сушилки.

Практический интерес представляет расчет теплопередачи через сложную стенку, например через металлическую стенку сушилки, покрытую слоем изоляции.

В этом случае задается температура окружающей среды для обеих сторон стенок и требуется определить количество теплоты, передаваемой через стенку от более нагретой среды к менее нагретой. Плотность теплового потока

$$q = \frac{1}{1/\alpha_1 + 1/\alpha_2 + \sum \delta_i \lambda_i} (t_1 - t_2), \quad (2.37)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от более нагретой среды к стенке, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\alpha_2$  – то же от стенки к менее нагретой среде, Вт/м<sup>2</sup>·К;

$\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя стенки, м;

$\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя стенки, Вт/м·К;

$t_1, t_2$  – температура более и менее нагретой среды.

Обозначив

$$\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \delta_i \lambda_i} = K, \quad (2.38)$$

получим уравнение теплопередачи для плоской стенки:

$$q = K(t_1 - t_2), \quad (2.39)$$

которое представляет собой закон Ньютона. Параметр  $K$  называется коэффициентом теплопередачи и показывает, какое количество теплоты проходит за единицу времени от более нагретой среды к менее нагретой через  $1 \text{ м}^2$  разделяющей их стенки при разности температур в один градус.

Обратная величина  $R = \frac{1}{K}$  называется термическим сопротивлением.

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \delta_i \cdot \lambda_i \quad (2.40)$$

Этот случай наиболее простой, но часто встречающийся в практике.

### 3. ПЕРЕНОС ТЕПЛОТЫ И ВЛАГИ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Сушку влажных материалов можно представить в виде двух процессов: переноса тепла и влаги в виде воды и пара внутри материала к поверхности испарения и переноса пара от поверхности в окружающую среду. Сочетание этих процессов определяет кинетику сушки.

В зависимости от интенсивности сушки процесс делится на несколько периодов. При малых интенсивностях испарения (мягкий режим сушки) различают два периода: период постоянной скорости сушки и период падающей скорости. Границы между периодами сушки называются критическими точками.

На рис. 3.1 представлены зависимости изменения скорости сушки  $dU/d\tau$  при уменьшении влагосодержания  $U$  материала в процессе сушки. На графике период постоянной скорости сушки показан горизонтальной прямой до первой критической точки  $U_{кр}$ , а период падающей скорости сушки изображен в виде пучка кривых линий (1 и 3), прямой (2) и ломаной кривой (4). Характер кривых зависит от свойств сушеного материала (пористый, коллоидный, мелкодисперсный и т.п.). В некоторых случаях в периоде падающей скорости сушки

может появляться вторая критическая точка  $U_{кр}$  (ломаная кривая 4), которая не всегда четко выражена и может иметь различное местоположение на графике.

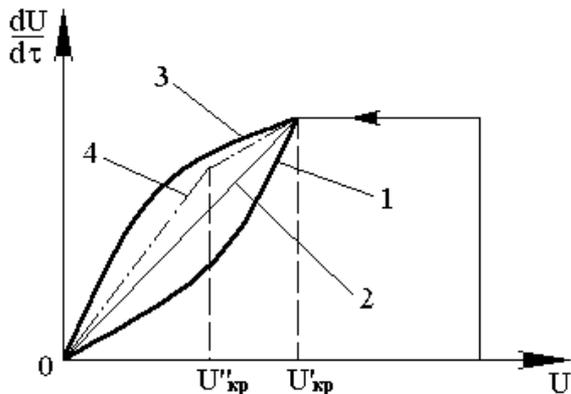


Рис. 3.1. Кривые скорости сушки

На рис. 3.2 иллюстрируется уменьшение влагосодержания  $U$  в зависимости от времени сушки при постоянных параметрах сушильного агента. Время  $\tau_0$  соответствует подогреву материала до температуры сушки и влагосодержание материала изменяется незначительно (отрезок  $AB$ ). Прямой наклонный отрезок  $BC$  соответствует периоду постоянной скорости сушки ( $\tau_1$ ), кривая  $CE$  – периоду падающей скорости сушки ( $\tau_2$ ). Точка  $E$  характеризует достижения материалом равновесной влажности, когда скорость сушки равна нулю.

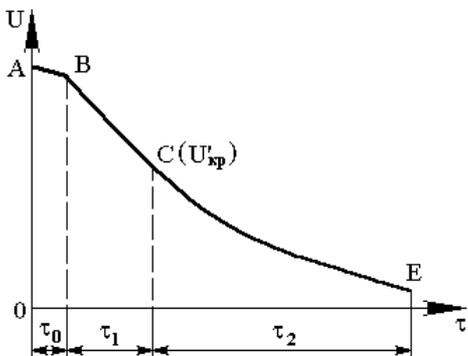


Рис. 3.2. Кривые убыли влаги

Первый период соответствует водонасыщенному состоянию материала, когда убыль влаги за счет испарения компенсируется ее поступлением из внутренних слоев. В этом периоде температура поверхности равна температуре смоченного термометра, иначе говоря, температуре адиабатического насыщения. Парциальное давление пара у поверхности испарения соответствует давлению насыщенного пара при температуре смоченного термометра. Коэффициенты тепло- и массообмена остаются неизменными.

В период падающей скорости сушки температура материала повышается. В этот период коэффициенты тепло- и массообмена снижаются, но в приближенных расчетах их значения все равно принимаются постоянными (для условий первого периода).

При больших интенсивностях сушки (жесткий режим сушки) закономерно тепло- и массообмена претерпевают значительные изменения. В этом случае температура материала не остается постоянной и непрерывно растет. Только в начале она равна температуре смоченного термометра. Поверхность испарения влаги постепенно углубляется внутрь материала, так как интенсивность миграции влаги внутри материала меньше, чем отвод ее с поверхности. Процесс внешнего массообмена зависит от условий окружающей среды, способности поглощать пары. Этим определяется скорость сушки. Так же, как и при теплообмене, движущей силой является градиент температуры; при влагообмене необходимым условием является разница парциальных давлений пара у поверхности материала  $P_M$  и в окружающей среде  $P_{II}$  ( $P_M > P_{II}$ ). При  $P_M = P_{II}$  наступает равновесное состояние и влагообмен не происходит.

При сушке капиллярно-пористых материалов внутренний перенос влаги происходит в виде жидкости и пара. В виде жидкости влага движется под действием капиллярных сил, в виде пара – диффузионных и конвективных сил. Перенос влаги под влиянием капиллярных и диффузионно-осмотических сил называется влагопроводностью материала.

Испарение влаги с поверхности материала приводит к тому, что влажность внутри объекта сушки оказывается выше, чем снаружи. Градиент влагосодержания  $\nabla U$  обуславливает перенос влаги путем влагопроводности:

$$J_U = -a_m \rho_c \nabla U, \tag{3.1}$$

где  $J_U$  – плотность потока влаги;

$a_m$  – коэффициент влагопроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\rho_c$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

Ряд параметров жидкости (поверхностное натяжение, вязкость) с изменением температуры изменяется, что приводит к дополнительному потоку влаги. Это обуславливает в капиллярно-пористых телах при наличии температурного градиента перемещение жидкости от более нагретых мест к менее нагретым. Это явление называется термовлагопроводностью [6, 7]. Плотность этого потока

$$J_t = -a_m \rho_c \delta_m \nabla t, \quad (3.2)$$

где  $J_t$  – отношение перепада влагосодержания  $\Delta U$  к перепаду температуры  $\Delta t$  ( $\delta_m = \frac{\Delta U}{\Delta t}$ ). Знак "-" (минус) показывает, что поток направлен против градиента. В общем случае поток влаги в капиллярно-пористых телах равен:

$$J = J_U + J_t = -a_m \rho_c \nabla U \pm a_m \rho_c \delta_m \nabla t = -a_m \rho_c (\nabla U \pm \delta_m \nabla t). \quad (3.3)$$

При конвективной сушке температурный градиент сравнительно невелик, что позволяет пренебречь потоком влаги, обусловленным термовлагопроводностью.

Если принять  $a_m, \delta_m$  постоянными, то получается дифференциальное уравнение влагообмена внутри капиллярно-пористых тел:

$$\frac{dU}{dt} = a_m (\nabla^2 U + \delta_m \nabla^2 t), \quad (3.4)$$

где  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа.

Когда потоком влаги за счет термовлагопроводности можно пренебречь, выражение (3.4) превращается в дифференциальное уравнение влагопроводности:

$$\frac{dU}{d\tau} = a_m \nabla^2 U . \quad (3.5)$$

Уравнение переноса теплоты по аналогии имеет вид

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{\varepsilon r}{C} \cdot \frac{dU}{d\tau} , \quad (3.6)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$C$  – теплоемкость материала, Дж/кг·К;

$\varepsilon$  – коэффициент фазового превращения, характеризующий долю газообразной фазы в процессе переноса,  $\varepsilon \in [0,1]$ ;

$r$  – удельная теплота испарения, Дж/кг.

При  $\varepsilon = 0$  вся влага перемещается в виде жидкости, при  $\varepsilon = 1$  только в виде пара.

Таким образом, математическая модель тепло- и массопереноса имеет вид системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dU}{d\tau} = a_m (\nabla^2 U + \delta \nabla^2 t) , \quad (3.7)$$

$$\frac{dt}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \varepsilon r / c \cdot \frac{dy}{d\tau} ; \quad (3.8)$$

при граничных условиях

$$\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)_n + q(\tau) - r(1 - \varepsilon) J_n(\tau) = 0 , \quad (3.9)$$

$$a_m \rho_c \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)_n + a_m \rho_c \delta \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)_n + J_n(\tau) = 0, \quad (3.10)$$

и начальных условиях

$$U = f_1(x), \quad t = f_2(x) \quad \text{при } \tau = 0.$$

Решение системы дифференциальных уравнений тепломассопереноса (3.7) и (3.8) совместно с граничными и начальными условиями позволяет получить полную картину распределения температуры и влаги во времени и координатах. Некоторые решения уже известны. Во многих случаях на базе модели получают критериальные уравнения, определив эмпирические коэффициенты которых получим уравнение для расчета.

## **4. ТЕРМОДИНАМИКА ВЛАЖНОГО ГАЗА**

### **4.1. Состав влажного газа**

В процессах сушки материалов наиболее распространенным рабочим телом является газ или воздух. Он может быть: теплоносителем, используемым для испарения влаги из материала; агентом сушки, воспринимающим и отводящим водяные пары, образуемые при испарении.

Газы представляют собой агрегатное состояние веществ, у которых взаимодействие между частицами практически отсутствует. Они двигаются свободно, заполняя весь предоставленный им объем, принимают его форму.

Влажный газ – механическая смесь сухих газов с водяным паром. Примером может служить атмосферный воздух, который всегда содержит определенное количество водяного пара (табл. 4.1).

Таблица 4.1

	Азот	Кислород	Инертные газы	Углекислый газ
По массе, %	75,52	23,15	1,28	0,046
По объему, %	78,09	20,95	0,93	0,03

В теплотехнических расчетах принимают объемное содержание азота  $N_2 = 79\%$ , кислорода  $O_2 = 21\%$ .

Водяной пар находится в атмосферном воздухе обычно в перегретом состоянии. По своим свойствам он близок к идеальным газам.

Пар – реальный газ, близкий к состоянию насыщения, т.е. превращения в жидкость. Насыщенным называется пар, находящийся в равновесии с жидкостью, из которой он образуется. Сухой насыщенный пар получается при полном испарении жидкости. Влажный насыщенный пар получается при неполном испарении жидкости и является смесью пара и мельчайших капелек жидкости.

Для определения состояния влажного газа пользуются такими физическими характеристиками, как температура, объем, давление, парциальное давление, плотность, удельный объем, влажность, влагосодержание, энтальпия, теплоемкость.

Для сухих газов и водяного пара в технических расчетах можно применять известные из термодинамики законы идеальных газов и газовых смесей.

#### 4.2. Характеристическое уравнение Клапейрона – Менделеева

Сухие и влажные газы подчиняются характеристическому уравнению Клапейрона – Менделеева, устанавливающему зависимость между давлением газа, его объемом и температурой:

$$PV = mRT, \tag{4.1}$$

где  $P$  – давление газа, Па;

$V$  – объем, занимаемый газом,  $m^3$ ;

$m$  – масса газа, кг;

$R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$T$  – абсолютная температура, К.

Термодинамическая температура может быть выражена двояко: в градусах абсолютной шкалы Кельвина (К) и в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ). Нуль отсчета по абсолютной шкале –  $273,15^{\circ}\text{C}$ , т.е.  $T = 273,15 + t$ , где  $t$  – температура по шкале Цельсия,  $^{\circ}\text{C}$ .

Парциальное ("частичное") давление – это давление газа, входящего в состав газовой смеси, которое он оказывал бы, занимая один весь объем смеси и находясь при температуре смеси.

Каждый газ, в том числе и пар, занимает тот же объем, который занимает смесь, имеет температуру смеси, но находится под своим парциальным давлением. Согласно закону Дальтона давление газовой смеси в определенном объеме равно сумме парциальных давлений отдельных газов, входящих в смесь, т.е.

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n,$$

где  $P_i$  – парциальное давление отдельных газов.

Для воздуха, который является влажным газом, барометрическое давление  $B$  равно сумме парциальных давлений его сухой части  $P_r$  и водяного пара  $P_n$ :

$$B = P_r + P_n. \tag{4.2}$$

Исходя из массы газа  $m$  и занимаемого им объема  $V$  можно определить его удельный объем  $v$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) и плотность  $\rho$  ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

$$v = V/m \text{ и } \rho = m/V. \tag{4.3}$$

Под газовой постоянной  $R$  понимается работа расширения 1 моля идеального газа при неизменном давлении при нагревании на 1 К. Уравнение состояния для 1 К моль газа принимает вид

$$PV\mu = MRT, \tag{4.4}$$

где  $M$  – молярная масса;

$V\mu$  – объем киломоля газа,  $\text{м}^3$ .

Моль – единица количества вещества. Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов (атомов, молекул и др.), сколько содержится атомов в изотопе углерода-12 массой 0,012 кг.

### 4.3. Содержание водяного пара в газовой смеси. Точка росы

Содержание водяного пара в газовой смеси может быть выражено абсолютной и относительной влажностью, а также влагосодержанием.

Абсолютной влажностью газа называется масса пара в 1 м<sup>3</sup> газовой смеси, т.е. фактически это плотность газа (кг/м<sup>3</sup>). Так как по закону Дальтона объем каждого компонента газовой смеси равен объему смеси, то абсолютная влажность численно равна плотности пара  $\rho_p$  при его парциальном давлении  $P_p$ . Из характеристического уравнения следует:

$$\rho_p = \frac{P_p}{R_p T}, \quad (4.5)$$

где  $R_p$  – газовая постоянная пара, Дж/(кг·К).

Газы и воздух могут содержать разное количество водяного пара – от нуля до максимального значения, определяемого наибольшим парциальным давлением пара в данных условиях. При температуре газовой смеси менее 100 °С максимальное содержание в ней пара соответствует состоянию полного насыщения. Для этих условий абсолютная влажность  $\rho_n$  будет равна:

$$\rho_n = \frac{P_n}{R_p T}, \quad (4.6)$$

где  $P_n$  – давление газа, насыщенного влажным паром при данной температуре.

Максимальное влагосодержание во влажном газе однозначно определяется температурой. Состояние полного насыщения газа водяным паром может быть получено различными путями.

Если влажный газ постепенно охлаждать, то при достижении определенной температуры, в зависимости от содержания водяного пара, последний начнет

конденсироваться в виде росы, наступит состояние насыщения. Температура, соответствующая предельному насыщению газа водяным паром, называется *точкой росы*. Она показывает температуру, до которой необходимо охлаждать влажный газ, чтобы он стал насыщенным.

Состояние насыщения можно получить другим путем: если во влажный газ при условии сохранения неизменной температуры смеси, постепенно вводить водяной пар. Содержание водяного пара будет увеличиваться до тех пор, пока не достигнет максимального значения, соответствующего пределу насыщения. После этого избыток пара будет конденсироваться.

Для суждения о степени приближения влажного газа к состоянию насыщения его водяным паром используют понятие относительной влажности газовой смеси.

Относительная влажность – отношение массы водяного пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> влажного газа  $\rho_{\text{п}}$  к максимально возможной массе водяного пара в состоянии насыщения  $\rho_{\text{н}}$  при той же температуре и барометрическом давлении. Относительную влажность газа выражают в долях единицы или процентах:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (4.7)$$

Относительная влажность характеризует способность газа насыщаться влагой: чем меньше  $\varphi$ , тем при прочих равных условиях больше сушильная способность газа. Для сухого газа  $\varphi = 0\%$ , при  $\varphi = 100\%$  газ является насыщенным.

Применяя уравнение Клапейрона и используя выражения (4.5) и (4.6), можно записать:

$$\varphi = \frac{P_{\text{п}} R_{\text{п}} T}{P_{\text{н}} R_{\text{п}} T} \cdot 100\% = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (4.8)$$

Парциальное давление насыщенного пара  $P_{\text{н}}$ , как и его плотность, зависит только от температуры. С ее повышением  $P_{\text{н}}$  возрастает. Поэтому при нагревании влажного газа его сушильная способность растет.

В сушильной технике  $\varphi$  определяется психрометрическим способом при помощи психрометра. Он состоит из двух термометров: сухого и мокрого. Последний отличается тем, что ртутный шарик обернут тканью, погруженной в воду. Тем самым к термометру непрерывно поступает влага, смачивающая шарик термометра. Испаряясь тем сильнее, чем суше газ, влага требует затрат тепла, равных теплоте парообразования, отбираемой от смоченной ткани. В результате температура смоченного термометра понижается. Неизменность температуры смоченной ткани (за счет притока теплоты извне) устанавливается не при температуре точки росы, а при несколько большей температуре, называемой температурой мокрого термометра.

Разность  $(t_c - t_m)$  называется психрометрической разностью. Чем она выше, тем суше среда и меньше относительная влажность  $\varphi$ . По показаниям сухого и мокрого термометров определяют относительную влажность газа  $\varphi$ .

В процессе сушки масса парогазовой смеси, как и ее объем, изменяется в зависимости от температуры и содержания водяного пара, а масса сухой части газа в процессе нагревания и сушки остается постоянной. Для оценки содержания водяного пара в газовой смеси, проходящегося на 1 кг ее сухой части, служит влагосодержание.

Влагосодержание  $d$  – масса водяного пара, отнесенная к массе 1 кг сухой части влажного газа. При расчетах сушильного процесса влагосодержание  $d$  выражается в граммах на 1 кг сухих газов, т.е.

$$d = \frac{\rho_{\text{п}} 1000}{\rho_{\text{Г сух}}}, \text{ г/кг сух.} \quad (4.9)$$

Применяя уравнение Клапейрона для пара и сухого газа, можно записать:

$$P_{\text{п}} V = m_{\text{п}} R_{\text{п}} T, \quad (4.10)$$

$$P_{\text{Г сух}} V = m_{\text{Г сух}} R_{\text{Г}} T. \quad (4.11)$$

Разделив первое уравнение на второе, получим:

$$m_{\text{п}}/m_{\text{Г}} = P_{\text{п}} R_{\text{Г}} / (P_{\text{Г}} R_{\text{п}}), \quad (4.12)$$

где  $m_{\text{п}}/m_{\text{г}}$  – влагосодержание газа, кг пара на 1 кг сухого газа.

Если принять массу пара в граммах, то

$$d = m_{\text{п}}/m_{\text{г}} \cdot 1000 \quad (4.13)$$

или

$$d = 1000 P_{\text{п}} R_{\text{г}} / (P_{\text{г}} R_{\text{п}}) . \quad (4.14)$$

Применительно к воздуху, представляющему смесь сухих газов и водяного пара, с учетом значений газовой постоянной для воздуха  $R_{\text{г}} = R_{\text{в}} = 187,1$  Дж/(кг·К) и водяного пара  $R_{\text{п}} = 461,5$  Дж/(кг·К) получим:

$$d = 1000 \cdot \frac{287,1}{461,5} \cdot \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{в}}} = 622 \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{в}}} , \quad (4.15)$$

где  $P_{\text{в}}$  – парциальное давление воздуха.

Заменив  $P_{\text{в}} = B - P_{\text{п}}$ , получим:

$$d = 622 \cdot \frac{P_{\text{п}}}{B - P_{\text{п}}} , \quad (4.16)$$

где  $B$  – барометрическое давление воздуха.

После преобразований получим:

$$P_{\text{п}} = \frac{Bd}{622 + d} . \quad (4.17)$$

Из этих уравнений следует, что влагосодержание  $d$  при данном барометрическом давлении зависит только от парциального давления водяного пара. Зная парциальное давление водяного пара  $P_{\text{п}}$  во влажном воздухе, можно определить его влагосодержание  $d$ , и наоборот.

Для пересчета количества абсолютно сухого газа на влажный необходимо знать переводную величину, называемую удельным объемом влажного газа.

Удельный объем влажного газа  $v_0$  – это объем влажного газа в  $\text{м}^3$ , приходящийся на 1 кг его сухой части. Размерность  $v_0$  –  $\text{м}^3/\text{кг}$  сух.

Из характеристического уравнения Клапейрона для газа

$$P_{\Gamma}V = m_{\Gamma}R_{\Gamma}T \quad (4.18)$$

можно написать выражение для определения удельного объема влажного газа:

$$v = \frac{V}{m_{\Gamma}} = \frac{R_{\Gamma}T}{P_{\Gamma}}. \quad (4.19)$$

Соответственно для воздуха

$$v = \frac{R_{\text{В}}T}{P_{\text{В}}}. \quad (4.20)$$

Парциальное давление сухого воздуха  $P_{\text{В}}$  можно определить из уравнения (4.17):

$$P_{\text{В}} = 622 B / (622 + d). \quad (4.21)$$

Подставив (4.21) в (4.20) при значениях барометрического давления  $B = 99325$  Па, газовой постоянной воздуха  $R_{\text{В}} = 287,1$  Дж/(кг·К) и абсолютной температуры  $T = 273,15 + t$ , получим:

$$v = 287,1(273,15 + t)(622 + d)/(622 \cdot 99325). \quad (4.22)$$

После преобразования удельный объем влажного воздуха

$$v = 4,64 \cdot 10^{-6}(273,15 + t)(622 + d), \text{ м}^3/\text{кг} \text{ сух.} \quad (4.23)$$

Таким образом, удельный объем влажного воздуха зависит от температуры и влагосодержания.

#### 4.4. Плотность парогазовой смеси

Расчет плотности парогазовой смеси, в том числе влажного воздуха, необходим при переходе от абсолютно сухого газа к влажному. Расчет вентиляторов, циклонов, пылесадителей и другого оборудования производят исходя из объема проходящей через них парогазовой смеси. По удельному объему влажного газа или воздуха  $v$  можно определить плотность парогазовой смеси ( $\text{кг}/\text{м}^3$  влажного газа):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{(1 + 0,001d)}{v} \quad (4.24)$$

(в числителе – масса влажного газа или воздуха, приходящаяся на 1 кг сухого).

Плотность любой парогазовой смеси (влажного газа) ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) можно представить в виде суммы плотностей сухого газа и водяного пара:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{Г}} + \rho_{\text{П}} \cdot \quad (4.25)$$

Соответственно для воздуха

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{В}} + \rho_{\text{П}} \cdot \quad (4.26)$$

Плотность сухой части влажного воздуха из уравнения состояния Клапейрона

$$\rho_{\text{В}} = P_{\text{В}} / (R_{\text{В}}T) \cdot \quad (4.27)$$

Заменяя согласно закону Дальтона  $P_{\text{В}} = B - P_{\text{П}}$  и подставив значение газовой постоянной для воздуха  $R_{\text{В}} = 287,1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , получим:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{B - P_{\text{п}}}{287,1 \cdot T}. \quad (4.28)$$

При барометрическом давлении воздуха  $B = 99325$  Па

$$\rho_{\text{в}} = \frac{99325 - P_{\text{п}}}{287,1 \cdot T}. \quad (4.29)$$

Соответственно для водяного пара

$$\rho_{\text{п}} = \frac{P_{\text{п}}}{R_{\text{п}} T} = \frac{P_{\text{п}}}{461,5 \cdot T}. \quad (4.30)$$

Отсюда плотность влажного воздуха как смеси сухого воздуха и водяного пара

$$\rho_{\text{см}} = \frac{99325 - P_{\text{п}}}{287,1 \cdot T} + \frac{P_{\text{п}}}{461,5 \cdot T} = \frac{346 - 0,0013P_{\text{п}}}{T}, \quad (4.31)$$

где  $P_{\text{п}}$  – парциальное давление газа, Па.

Из этого уравнения следует, что при постоянной температуре плотность воздуха, как и любой парогазовой смеси, с увеличением парциального давления пара уменьшается. Таким образом, влажный газ легче сухого. Это вытекает также из разницы молекулярных масс пара ( $M_{\text{п}} = 18$ ) и сухого воздуха ( $M_{\text{в}} = 29$ ). Чем больше парциальное давление пара, тем легче влажный газ. С повышением температуры плотность газовой смеси уменьшается.

#### 4.5. Энтальпия и теплоемкость влажного газа

Основной теплофизической характеристикой влажного газа, используемого в качестве теплоносителя, является энтальпия (теплосодержание). Энтальпия влажного газа определяется его теплоемкостью и температурой.

Теплоемкость тела  $C$  – количество теплоты, необходимое для нагрева этого тела на 1 К. Теплоемкость единицы количества вещества называют удельной теплоемкостью. Поскольку обычно имеют дело с удельной теплоемкостью, то часто ее называют просто теплоемкостью. От того, в каких единицах измеряется количество нагреваемого вещества, теплоемкость может быть массовой, объемной или мольной.

Если теплоемкость твердых и жидких тел обуславливается их физическими свойствами и мало изменяется при возрастании температуры, то теплоемкость газов и водяного пара зависит от температуры и условий передачи теплоты при нагревании.

Теплоемкость газов и водяного пара незначительно зависит от давления, поэтому данные, приведенные в табл. 4.2, могут быть использованы в широком диапазоне изменения парциальных давлений.

Таблица 4.2

Значения массовых теплоемкостей некоторых газов

Температура, °С	Теплоемкость $C$ , кДж/(кг·К)					
	воздуха	водяного пара	азота	окиси углерода CO	кислорода	двуоксида углерода CO <sub>2</sub>
0	1,0036	1,8594	1,0392	1,0396	0,9148	0,8148
100	1,0103	1,8903	1,0421	1,0446	0,9337	0,9136
200	1,0245	1,9406	1,0517	1,0584	0,9630	0,9927
300	1,0446	2,0005	1,0693	1,0802	0,9948	1,0567
400	1,0685	2,0645	1,0915	1,1057	1,0237	1,1103
500	1,0923	2,1319	1,1154	1,1321	1,0484	1,1542
600	1,1149	2,2014	1,1392	1,1568	1,0689	1,1920
700	1,1355	2,2730	1,1614	1,1790	1,0856	1,2230
800	1,1539	2,3450	1,1815	1,1987	1,0999	1,2493
900	1,1702	2,4154	1,1974	1,2158	1,1120	1,2715
1000	1,1844	2,4850	1,2150	1,2305	1,1290	1,2900
1100	1,9770	2,5456	1,2288	1,2435	1,1317	1,3059
1200	1,2083	2,6042	1,2410	1,2544	1,1401	1,3197

При расчете энтальпии газовой смеси пользуются удельной массовой теплоемкостью влажного газа, которую относят не к 1 кг смеси, а к 1 кг сухой ее части.

Удельная массовая теплоемкость влажного газа  $C_{см}$  – количество теплоты, необходимое для повышения на 1 градус температуры смеси, содержащей 1 кг сухого газа (кДж/(кг сух.·К)).

$$C_{см} = C_{г} + 0,001 d C_{п}, \quad (4.32)$$

где  $C_{г}$  и  $C_{п}$  – теплоемкость соответственно сухого газа и пара.

Для влажного воздуха массовая теплоемкость рассчитывается по аналогичной формуле:

$$C_{см} = C_{в} + 0,001 d C_{п}. \quad (4.33)$$

Значения теплоемкости сухой части газа и водяного пара зависят от температуры, поэтому берутся из табличных данных.

По теплоемкости и температуре твердого или газообразного тела производят расчет энтальпии.

Энтальпия  $I$  – количество теплоты, необходимое для нагревания единицы массы тела от нуля до данной температуры, включая теплоту на изменение агрегатного состояния.

Энтальпия влажного газа или воздуха  $I$  равна сумме энтальпий сухого газа  $I_{г}$  и энтальпии содержащегося во влажном газе  $0,001d$  кг водяного пара  $I_{п}$ . Обычно энтальпию газовой смеси относят к 1 кг сухой части и называют удельной энтальпией влажного газа.

$$I = I_{г} + I_{п}, \text{ кДж/кг сух. газа.} \quad (4.34)$$

Энтальпия сухого газа (кДж/кг) при температуре  $t$  °С

$$I_{г} = C_{г} t, \quad (4.35)$$

где  $C_{г}$  – теплоемкость сухого газа при температуре от 0 до  $t$  °С.

Энтальпия содержащегося во влажном газе  $0,001d$  кг водяного пара

$$I_{\text{п}} = 0,001 d i_{\text{п}}, \quad (4.36)$$

где  $i_{\text{п}}$  – удельная энтальпия 1 кг пара, находящегося в воздухе, кДж/кг пара.

Энтальпия водяного пара  $i$  (кДж/кг) при температуре  $t$  определяется по уравнению

$$i_{\text{п}} = r + C_{\text{п}} t, \quad (4.37)$$

где  $C_{\text{п}}$  – теплоемкость пара при температуре от 0 до  $t$  °С, кДж/кг·К;

$r$  – теплота парообразования, которая показывает теплосодержание пара при  $t = 0$  °С; по опытным данным  $r = 2501$  кДж/кг пара [8].

Удельная энтальпия влажного газа определяется как сумма энтальпий его частей:

$$I = C_{\text{г}} t + 0,001 d i_{\text{п}}. \quad (4.38)$$

Подставив в (4.37) значение  $I_{\text{п}}$ , получим:

$$I = C_{\text{г}} t + 0,001 d (2501 + C_{\text{п}} t) = (C_{\text{г}} + 0,001 d C_{\text{п}}) t + 2,5 d. \quad (4.39)$$

Выражение в скобках представляет собой удельную теплоемкость влажного газа, т.е. смеси, поэтому можно записать:

$$I = C_{\text{см}} t + 2,5 d, \quad (4.40)$$

где  $d$  – влагосодержание, г/кг сух. газа.

Первый член этого уравнения характеризует активный запас тепловой энергии влажного газа, расходуемый на сушку. При этом в процессе сушки температура снижается.

Второй член учитывает пассивный запас тепловой энергии. Эта теплота может быть использована в случае охлаждения влажного газа ниже точки росы, когда в процессе конденсации будет выделяться теплота парообразования. Охлаждение парогазовой смеси ниже температуры полного насыщения произ-

водится в специальных устройствах. Теплота конденсации используется, например, для подогрева воды.

Таким образом, для испарения воды из материала и покрытия тепловых потерь в процессе сушки используется теплота перегрева влажной (парогазовой) смеси, которая равна произведению теплоемкости влажного газа на температуру, т.е.  $C_{см} \cdot t$ . При уменьшении активного запаса теплоты влажного газа соответственно возрастает ее пассивная часть (2,5 d). Испаряемая при сушке влага превращается в пар, содержащий теплоту парообразования, которая может быть использована при конденсации.

## 5. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сушильная установка состоит из следующих основных элементов: генератора теплоты; сушильной камеры, в которой протекает процесс сушки материала; вентиляционных устройств для подачи и отвода сушильного агента; пылеосадительных и очистных аппаратов, а также транспортирующих механизмов, производящих загрузку, перемещение и выгрузку материала.

Основным этапом проектирования сушильной установки является расчет сушильного процесса, включающего составление материального и теплового балансов, определение необходимого количества сушильного агента.

### 5.1. Теплофизическая схема сушильного процесса

Теплофизическая схема сушильного процесса представлена на рис. 5.1. Схема включает генератор теплоты 1 (калорифер, топка и т.п.) и сушильную камеру 2 с подводом дополнительной теплоты  $Q_d$  (или без него).

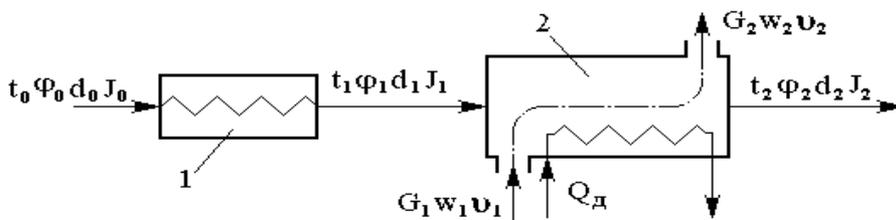


Рис. 5.1. Теплофизическая схема сушильного процесса:  
1 – генератор теплоты; 2 – сушильная камера

Состояние сушильного агента, представляющего смесь сухого газа или воздуха с водяным паром, характеризуется обычно температурой  $t$ , относительной влажностью  $\varphi$ , влагосодержанием  $d$  и удельной энтальпией  $I$ . Их изменение в процессе сушки отмечается соответствующими индексами. Для наружного воздуха принимается индекс 0, для сушильного агента на входе в сушилку – 1, на выходе – 2. Аналогичные индексы имеет сушимый материал: на входе – 1, на выходе – 2.

Материал перед сушилкой имеет массу  $G_1$ , влажность  $w_1$  и температуру  $\vartheta_1$ . В процессе сушки происходит удаление влаги, что сопровождается изменением массы, влажности и температуры материала до значений  $G_2$ ,  $w_2$ ,  $\vartheta_2$ .

При отсутствии потерь материала в процессе сушки количество абсолютно сухого вещества, заключенного в нем, остается постоянным.

## 5.2. Материальный баланс сушилки

Материальный баланс сушилки заключается в определении количеств исходного и высушенного материала, а также количества испаренной влаги. Составление материального баланса сушилки основывается на законе сохранения вещества, согласно которому масса материала, входящего в сушилку  $G_1$ , равна сумме масс высушенного материала  $G_2$  и испаренной влаги  $W$ :

$$G_1 = G_2 + W, \tag{5.1}$$

$$G_2 = G_1 - W. \tag{5.2}$$

Количество испаряемой в сушилке влаги

$$W = G_1 - G_2. \tag{5.3}$$

Так как  $G_1 \frac{100 - w_1}{100} = G_2 \frac{100 - w_2}{100}$ ,

$$\tag{5.4}$$

$$\text{то } G_2 = G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \quad (5.5)$$

Следовательно,

$$W = G_1 - G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2} = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} \quad (5.6)$$

$$\text{или } W = G_2 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1}. \quad (5.7)$$

Эти выражения позволяют определить производительность сушилки по исходному материалу и испаренной влаге при заданных значениях влажности до и после сушки материала, а также необходимого количества высушенного материала. Можно производить и обратный расчет сушилки, т.е. определить производительность сушилки по высушенному материалу, если известно количество загружаемого исходного материала.

Таким образом, для составления материального баланса необходимо знать три величины: производительность по сухому материалу, его начальную и конечную влажность.

Приведенные соотношения составлены без учета потерь материала в процессе сушки. В действительности часть материала теряется при загрузке, уносится с агентом сушки, удаляется со шламовой водой при мокрой очистке и т.п. Потери учитываются коэффициентом потерь материала  $\xi$  (%) и определяются опытным путем. С учетом потерь выход высушенного материала будет меньше:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2} \cdot \frac{(1 - \xi)}{100}. \quad (5.8)$$

Поэтому чтобы получить заданное количество высушенного материала  $G_2$ , необходимо увеличить количество исходного материала  $G_1$ :

$$G_1 = \frac{G_2(100 - w_1)}{100 - w_2} \cdot \frac{100}{(1 - \xi)}. \quad (5.9)$$

### 5.3. Баланс влаги и расход сушильного агента

В процессе сушки количество влажного газа изменяется в зависимости от его температуры и влагосодержания. Пренебрегая утечками сушильного агента или присосами наружного воздуха, можно считать количество сухого газа, проходящего через сушилку, постоянным. Поэтому баланс влаги при установившемся режиме сушки будет выражать равенство между количеством влаги, поступающей в сушилку и вышедшей из нее вместе с материалом и сушильным агентом:

$$\frac{G_1 w_1}{100} + L \frac{d_1}{1000} = \frac{G_2 w_2}{100} + L \frac{d_2}{1000}, \quad (5.10)$$

где  $\frac{G_1 w_1}{100}$  и  $\frac{G_2 w_2}{100}$  – расход влаги, содержащейся в материале до и после сушки, кг/ч;

$L$  – расход сухой части сушильного агента, кг/ч;

$L \frac{d_1}{1000}$  и  $L \frac{d_2}{1000}$  – расход влаги, содержащейся в сушильном агенте до и после сушки, кг/ч.

Уравнение баланса влаги можно переписать в следующем виде:

$$\frac{G_1 w_1}{100} - \frac{G_2 w_2}{100} = L \frac{d_2}{1000} - L \frac{d_1}{1000}. \quad (5.11)$$

Левая часть уравнения (5.11) представляет собой количество испаренной из материала влаги, кг/ч:

$$W = \frac{G_1 w_1}{100} - \frac{G_2 w_2}{100}, \quad (5.12)$$

Тогда можно переписать:

$$W = L \frac{d_2 - d_1}{1000} \quad \text{или} \quad \frac{L}{W} = \frac{1000}{d_2 - d_1}. \quad (5.13)$$

Отношение  $L/W$  представляет собой удельный расход сухого сушильного агента, показывающий, сколько необходимо сухих газов (кг) для испарения 1 кг влаги (кг сух. газов/кг испаренной влаги). Обозначив через  $\ell = L/W$ , получаем основное уравнение для расчета сухого сушильного агента в сушильной установке:

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_1}. \quad (5.14)$$

Удельный расход сухого агента уменьшается с увеличением  $d_2$  и возрастает с увеличением  $d_1$ .

#### 5.4. Тепловой баланс

Составление теплового баланса дает возможность определить количество теплоты, вводимой в сушилку в единицу времени и расход ее на 1 кг испаренной влаги.

Уравнение теплового баланса для установившегося режима сушки выражает равенство количества теплоты, поступающей в сушилку и уходящей из нее.

Общий расход теплоты в сушилке может быть выражен формулой

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_d, \text{ кДж/ч}, \quad (5.15)$$

где  $Q_1$  – расход теплоты на испарение влаги;  
 $Q_2$  – расход теплоты на подогрев сушильного агента;  
 $Q_3$  – расход теплоты на подогрев материала;  
 $Q_4$  – расход теплоты на подогрев транспортирующих устройств;  
 $Q_5$  – потери тепла в окружающую среду;  
 $Q_d$  – дополнительный подвод теплоты (если он есть).

Если каждый член уравнения (5.15) разделить на количество воды  $W$ , испаряемой в сушилке за 1 ч, то получим удельные расходы теплоты на испарение 1 кг влаги по каждой из перечисленных статей расхода. В случае если  $Q_d = 0$ , имеем:

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{Q_1}{W} + \frac{Q_2}{W} + \frac{Q_3}{W} + \frac{Q_4}{W} + \frac{Q_5}{W} =$$

$$= q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \text{ кДж/кг влаги.} \quad (5.16)$$

#### 5.4.1. Уравнение теплового баланса теоретической сушилки

Если предположить, что при сушке теплота расходуется только на испарение влаги  $Q_1$  и на подогрев сушильного агента  $Q_2$ , то это будет соответствовать идеальному процессу, осуществление которого возможно только в теоретической сушилке.

Теоретическая сушилка отличается от действительной отсутствием потерь теплоты: в окружающую среду ( $Q_5 = 0$ ), на подогрев транспортных устройств ( $Q_4 = 0$ ) и сушимого материала ( $Q_3 = 0$ ), причем сушка протекает при постоянной температуре материала, т.е.  $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \text{const}$ .

В теоретическую сушилку теплота поступает с сушильным агентом и с сушимым материалом, а уходит из нее с теми же компонентами, но при других значениях параметров.

Так как  $G_1 = G_2 + W$ , то теплоту, поступающую в сушилку с материалом, можно представить так:

$$G_2 C_m \vartheta_1 + W C_{\text{вд}} \vartheta_1,$$

где  $C_m$  – теплоемкость материала;  $\vartheta_1$  – его температура;

$C_{\text{вд}}$  – теплоемкость воды;  $\vartheta_1$  – ее температура.

Уравнение теплового баланса теоретической сушилки можно представить в виде

$$LI_1 + G_2 C_m \vartheta_1 + W C_{вд} \vartheta_1 = LI_2 + G_2 C_m \vartheta_2, \text{ кДж/ч}, \quad (5.17)$$

где  $LI_1$  и  $LI_2$  – теплота, поступившая в сушилку и вышедшая из нее с сушильным агентом, кДж/ч;

$L$  – расход сухой части сушильного агента, кг сух/ч;

$G_2 C_m \vartheta_2$  – теплота, уносимая материалом из сушилки, кДж/кг.

Так как для теоретической сушилки  $\vartheta_1 = \vartheta_2$ , то

$$LI_1 + W C_{вд} \vartheta_1 = LI_2 \quad (5.18)$$

или

$$I_2 = I_1 + \frac{W}{L} \cdot C_{вд} \vartheta_1 = I_1 + \frac{C_{вд} \vartheta_1}{\ell}. \quad (5.19)$$

Если принять, что сушка в теоретической сушилке происходит не только при постоянной температуре материала, но и при  $\vartheta_1 = \vartheta_2 = 0$ , то уравнение теплового баланса теоретической сушилки упростится и будет иметь вид

$$I_2 = I_1. \quad (5.20)$$

Равенство энтальпий сушильного агента до сушки и после нее показывает, что в теоретической сушилке снижение температуры агента сушки  $t$  компенсируется увеличением его влагосодержания  $d$ , т.е.

$$I_2 = I_1 = C_{см} + 2,5d = \text{const}. \quad (5.21)$$

В рассматриваемом случае теплота, затрачиваемая на сушку, сообщается воздуху только в нагревателе - калорифере (рис. 5.2):

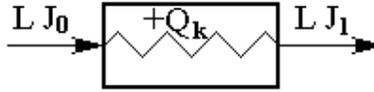


Рис. 5.2. Подогрев сушильного агента в калорифере

Процесс нагрева сушильного агента в калорифере можно представить в виде уравнения

$$LI_0 + Q_k = LI_1, \quad (5.22)$$

где  $LI_0$  – теплота сушильного агента до калорифера, кДж/ч;

$Q_k$  – теплота, сообщаемая агенту в калорифере, кДж/ч.

Откуда

$$Q_k = L(I_1 - I_0). \quad (5.23)$$

Разделив обе части на  $W$ , получим:

$$\frac{Q_k}{W} = \frac{1}{W}(I_1 - I_0), \quad (5.24)$$

$$q_k = \ell(I_1 - I_0), \quad (5.25)$$

$q_k = \frac{Q_k}{W}$  – удельный расход теплоты в калорифере, кДж/кг.

При  $\vartheta_1 \neq 0$  имеем:

$$q_k = \ell(I_1 - I_0) - C_{вд} \vartheta_1 \quad (5.26)$$

(вместо  $I_1$  подставляем из (5.19)  $(I_2 - \frac{C_{\text{вд}} \vartheta_1}{\ell})$ ).

Выразив удельную энтальпию сушильного агента как сумму энтальпий сухого газа и водяного пара (4.36)

$$I = C_r t + 0,001 d i_{\text{п}}$$

и подставив в (5.26), после преобразований получим:

$$q = q_1 + q_2; \tag{5.27}$$

$$q_1 = i_{\text{п}} - C_{\text{вд}} \vartheta_1; \tag{5.28}$$

$$q_2 = \ell \cdot C_{\text{см}}(t_2 - t_0), \tag{5.29}$$

где  $I_{\text{п}}$  – энтальпия пара при параметрах уходящего из сушилки агента сушки;

$q_1$  – удельный расход теплоты на испарение влаги из материала, кДж/кг;

$q_2$  – удельный расход теплоты на подогрев сушильного агента от исходной температуры  $t_0$  до конечной  $t_2$ .

Таким образом, в теоретической сушилке теплота расходуется лишь на подогрев сушильного агента и на испарение влаги из материала.

#### 5.4.2. Затраты теплоты в действительной сушилке

В действительной сушилке, в отличие от теоретической, теплота расходуется не только на испарение влаги из материала и подогрев сушильного агента, но и на подогрев материала, температура которого не остается постоянной ( $\vartheta_1 \neq \vartheta_2 \neq 0$ ), на подогрев транспортных устройств и покрытие потерь в окружающую среду. В сушилке также может быть дополнительный внутренний подогрев  $Q_{\text{д}}$ .

Удельный расход теплоты в действительной сушилке  $q$  (кДж/кг испаренной влаги) (5.16):

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5$$

или

$$q = q_1 + q_2 + \sum q_{\text{п}}, \quad (5.30)$$

где  $q_1 + q_2$  – полезно затраченная теплота;

$\sum q_{\text{п}} = q_3 + q_4 + q_5$  – потери теплоты в сушилке.

**Удельный расход теплоты на испарение влаги из материала**  $q_1$  представляет собой полезно израсходованную теплоту и определяется выражением (5.28):

$$q_1 = i_{\text{п}}'' - C_{\text{вд}} \cdot \vartheta_1,$$

где  $i_{\text{п}}'' = 2501 + C_{\text{п}} t_2$  – энтальпия пара при параметрах уходящего из сушилки агента сушки;

$C_{\text{вд}}$  – теплоемкость воды;

$\vartheta_1$  – температура воды, содержащейся в материале при загрузке его в сушилку.

Температура сушильного агента на выходе из сушилки должна обеспечивать надежную работу пылеосадительных и других аппаратов без конденсации водяного пара. Температура отработавших газов должна быть выше точки росы  $t_p$  на 20 – 25 °С, т.е.

$$t_2 \geq t_p + 25 \text{ °С}. \quad (5.31)$$

**Удельный расход теплоты на подогрев сушильного агента**  $q_2$  определяется по одному из равнозначных выражений (5.29):

$$q_2 = \ell \cdot C_{\text{см}} (t_2 - t_0),$$

$$q_2 = \ell \left[ C_r (t_2 - t_0) + 0,001 d_0 (i''_{\text{п}} - i^0_{\text{п}}) \right], \quad (5.32)$$

$$q_2 = \ell (t_2 - t_0) (C_r + 0,001 d_0 \cdot C_{\text{п}}). \quad (5.33)$$

**Удельный расход теплоты на подогрев материала**

$$q_3 = \frac{G_2}{W} C_{\text{м}} (\vartheta_2 - \vartheta_1), \quad (5.34)$$

где  $\frac{G_2}{W}$  – расход высушенного материала на 1 кг испаренной влаги;

$C_{\text{м}}$  – теплоемкость материала при влажности  $w_2$ ;

$\vartheta_1$  и  $\vartheta_2$  – температура материала при входе в сушилку и на выходе из нее, °С.

Массовая теплоемкость материала  $C_{\text{м}}$  (кДж/(кг·К)) складывается из теплоемкости его сухой части  $C_{\text{сух}}$  и теплоемкости воды  $C_{\text{вд}}$ :

$$C_{\text{м}} = C_{\text{сух}} \frac{100 - w_2}{100} + C_{\text{вд}} \frac{w_2}{100}. \quad (5.35)$$

Теплоемкость воды составляет  $C_{\text{вд}} = 4,19$  кДж/(кг·К), а теплоемкость сухой части зависит от вида и структуры материала; для торфа разных типов значения теплоемкости сухой части составляют  $C_{\text{сух}} = 1,73 \dots 2,0$  кДж/(кг·К).

Температура материала на входе в сушилку зависит от условий хранения, режима предшествующих технологических операций. Она задается техническими условиями или принимается равной температуре окружающей среды.

Температура материала на выходе из сушилки зависит от режима сушки, конструкции сушилки, а также, в значительной степени, от влажности высушенного материала: чем меньше его конечная влажность, тем выше температура высушенного материала.

**Удельный расход теплоты на нагревание транспортных устройств  $q_4$ .** В качестве транспортных устройств применяются вагонетки, тележки, конвейеры, ролики и другие приспособления, на которые укладывают материал перед сушкой. Проходя вместе с материалом через сушилку, транспортные устройства нагреваются, а на выходе из нее теряют приобретенную часть теплоты. Если транспортные устройства находятся в самой сушилке, то теплота ими не выносится и потерь нет.

Удельный расход теплоты на нагревание транспортных устройств определяется по формуле

$$q_4 = \frac{G_{\text{тр}}}{W} C_{\text{тр}} (\vartheta''_{\text{тр}} - \vartheta'_{\text{тр}}), \quad (5.36)$$

где  $G$   $m/W$  – масса транспортных устройств в расчете на 1 кг испаренной влаги;

$\vartheta''_{\text{тр}}$  и  $\vartheta'_{\text{тр}}$  – температура транспортных устройств при входе и выходе из сушилки, °C;

$C_{\text{тр}}$  – теплоемкость материала, из которого изготовлены транспортные устройства, кДж/(кг·K).

**Потери теплоты в окружающую среду** обусловлены тепловыделением ограждающих поверхностей сушилки. Удельный расход теплоты на покрытие потерь в окружающую среду  $q_5$  рассчитывается по известным формулам теплопередачи как сумма потерь отдельными участками:

$$q_5 = \sum_{i=1}^h (F\alpha_i \cdot \Delta t_{\text{cp}}) / W, \quad (5.37)$$

где  $F_i$  – площадь отдельных поверхностей сушилки,  $m^2$ ;

$\alpha_i$  – коэффициент теплопередачи через отдельные поверхности, Вт/( $m^2 \cdot K$ );

$\Delta t_{\text{cp}}$  – средняя разность температур для отдельного участка

$$\Delta t_{\text{cp}} = t_{\text{вн}} - t_{\text{нор}};$$

$t_{\text{вн}}$  – средняя температура внутренней поверхности ограждения сушилки;

$t_{\text{нар}}$  – средняя температура окружающего воздуха в наружном помещении, °С.

Разделение ограждающих поверхностей сушилки на отдельные участки производится в зависимости от их конструкции, рода материалов, степени нагретости. Коэффициент теплопередачи  $\alpha_i$  определяется для каждого участка согласно теории теплообмена.

Теплоизоляцию сушилки, устанавливаемую в помещении, подбирают с расчетом, чтобы температура поверхности ограждающего участка не превышала 40 °С. Точный расчет потерь теплоты в окружающую среду необходим для расчета систем отопления и вентиляции сушильного помещения. При больших тепловыделениях в зимнее время отпадает необходимость в отоплении. Летом для создания нормальных условий работы потребуется система приточно-вытяжной вентиляции.

На основании опытных данных потерь теплоты в окружающую среду при сушке, например, углей с точностью, достаточной для практических целей, параметр  $q_5$  можно определить по формуле

$$q_5 = 0,05(q_1 + q_3) . \tag{5.38}$$

Некоторые авторы [8] удельные потери теплоты в окружающую среду рекомендуют принимать в пределах  $q_5 = 170 \dots 420$  кДж/кг, при этом меньшие величины относятся к сушке более влажных материалов, например торфа.

#### *5.4.3. Уравнение теплового баланса действительной сушилки*

Зная отдельные статьи расхода теплоты в действительной сушилке, можно составить развернутое уравнение теплового баланса для установившегося режима работы в расчете на 1 ч. Данные сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Статья баланса	Приход, кДж/ч	Расход, кДж/ч
Теплота с сушильным агентом	$L I_0 + Q_k$	$L I_2$
Теплота с материалом	$G_2 C_m \vartheta_1 + W C_{вд} \vartheta_1$	$G_2 C_m \vartheta_2$
Теплота с транспортными устройствами	$G_{тр} C_{тр} \vartheta'_{тр}$	$G_{тр} C_{тр} \vartheta''_{тр}$
Дополнительный нагрев сушильного агента	$Q_d$	-
Потери теплоты в окружающую среду	-	$Q_5$

Здесь  $Q_k$  – теплота, сообщаемая сушильному агенту (воздуху) от нагревателя (калорифера), кДж/ч;

$L$  – расход сухого сушильного агента, кг/ч;

$L I_0, L I_2$  – теплота, поступающая в сушилку и уносимая из сушилки сушильным агентом, кДж/ч;

$C_{вд}, C_m, C_{тр}$  – теплоемкость соответственно воды, сушеного материала, материала транспортных устройств, кДж/(кг·К);

$\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta'_{тр}, \vartheta''_{тр}$  – температура сушеного материала и материала транспортных устройств до и после сушки.

Таким образом, можно составить уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned}
 Q_k + L_0 I_0 + G_2 C_m \vartheta_1 + W C_{вд} \vartheta_1 + G_{тр} C_{тр} \vartheta'_{тр} + Q_d &= \\
 &= L I_2 + G_2 C_m \vartheta_2 + G_{тр} C_{тр} \vartheta'_{тр} + Q_5.
 \end{aligned}
 \tag{5.39}$$

Отнеся расход тепла к 1 кг испаренной влаги  $W$  и проведя некоторые преобразования уравнения (5.39), получим:

$$\begin{aligned}
 q_k = \frac{Q_k}{W} &= \frac{L}{W} (I_2 - I_0) + \frac{G_2}{W} C_m (\vartheta_2 - \vartheta_1) - C_{вд} V_1 + \\
 &+ \frac{G_{тр}}{W} C'_{тр} (\vartheta''_{тр} - \vartheta'_{тр}) - \frac{Q_d}{W} + \frac{Q_5}{W}.
 \end{aligned}
 \tag{5.40}$$

Проведем дальнейшие упрощения уравнения:

$$q_k = \ell(I_2 - I_0) - C_{\text{вд}} \vartheta_1 + q_3 + q_4 + q_5 - q_d. \quad (5.41)$$

Обозначив потери теплоты  $q_3 + q_4 + q_5 = \sum q_{\text{п}}$ , получим:

$$q_k = \ell(I_2 - I_0) - C_{\text{вд}} \vartheta_1 + \sum q_{\text{п}} - q_d. \quad (5.42)$$

Процесс нагрева сушильного агента в калорифере, как ранее указывалось, может быть выражен  $q_k = \ell(I_1 - I_0)$ . Поэтому

$$\ell(I_1 - I_0) = \ell(I_2 - I_0) - C_{\text{вд}} \vartheta_1 + \sum q_{\text{п}} - q_d. \quad (5.43)$$

После преобразований получим:

$$\ell(I_2 - I_1) = C_{\text{вд}} \vartheta_1 - \sum q_{\text{п}} + q_d. \quad (5.44)$$

Выражение, стоящее в левой части уравнения (5.44), обычно обозначают следующим образом:

$$\Delta = C_{\text{вд}} \vartheta_1 - \sum q_{\text{п}} + q_d. \quad (5.45)$$

Величина  $\Delta$  называется поправкой на действительную сушилку и представляет собой потерянную или дополнительно сообщенную теплоту на 1 кг испаренной влаги:

$$\Delta = \ell(I_2 - I_1). \quad (5.46)$$

Полученное выражение

$$I_2 = I_1 + \frac{\Delta}{\ell} \quad (5.47)$$

является основным уравнением, характеризующим изменение энтальпии влажного газа в действительной сушилке.

Если  $\Delta = 0$ , то  $I_2 = I_1$ , что соответствует теоретической или действительной сушилке. В последней

$$C_{\text{вд}} + q_{\text{п}} = \sum q_{\text{п}}.$$

В сушилках, в которых отсутствует приток добавочной теплоты ( $q_{\text{д}} = 0$ ), величина  $\Delta$  становится отрицательной ( $\Delta < 0$ ), так как  $C_{\text{вд}} < q_{\text{п}}$  и  $I_2 < I_1$ , т.е. энтальпия влажного газа на выходе из сушилки будет меньше, чем на входе.

Для сушилок, в которых добавочная теплота превышает потери ( $q_{\text{д}} + C_{\text{вд}} \vartheta_1 > q_{\text{п}}$  и  $\Delta > 0$ ), энтальпия газовой смеси на выходе будет больше, чем на входе, т.е.  $I_2 > I_1$ .

## 6. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ СУШИЛОК С ПОМОЩЬЮ *Id*-ДИАГРАММЫ

### 6.1. Построение *Id*-диаграммы

Задача теплового расчета сушилок значительно упрощается с использованием диаграммы проф. Рамзина. В основу графоаналитического метода расчета сушилок положено применение *Id*-диаграммы ( $I$  – энтальпия,  $d$  – влагосодержание).

*Id*-диаграмма, построенная для влажного воздуха, имеющего постоянное давление 101, 325 кПа, позволяет проследить за изменением всех его параметров. С ее помощью можно упростить расчеты и наглядно проводить исследования процессов сушки.

На диаграмме (рис. 6.1) нанесены:

линии постоянного влагосодержания ( $d = \text{const}$ ) – вертикальные прямые, параллельные оси ординат;

линии постоянной энтальпии ( $I = \text{const}$ ) – прямые, идущие под углом  $45^\circ$  к горизонту;

линии постоянных температур (изотермы  $t = \text{const}$ ) – семейство расходящихся и идущих под острым углом к горизонту прямых;

линии постоянной относительной влажности ( $\varphi = \text{const}$ ) – семейство расходящихся кривых, имеющих перелом при  $t = 100^\circ\text{C}$ .

линии парциальных давлений  $P_{\text{п}}$ .

Свойства воздуха как основного рабочего тела сушильной установки наиболее полно можно охарактеризовать его энтальпией  $I$  и влагосодержанием  $d$ . Эти параметры влажного воздуха и приняты за оси координат (см. рис. 6.1). Для построения кривых относительной влажности угол между осями координат взят тупой, равный  $135^\circ$ .

На  $Id$ -диаграмме наклонные под углом  $135^\circ$  линии, параллельные развернутой оси абсцисс, являются линиями построения удельных энтальпий ( $I = \text{const}$ ). Вертикальные линии, проведенные параллельно оси ординат, являются линиями постоянных влагосодержаний ( $d = \text{const}$ ). Для удобства пользования диаграммой наклонная шкала влагосодержаний не проводится, а вместо нее наносится под прямым углом к оси ординат вспомогательная линия, на которую проецируются значения влагосодержания с наклонной оси.

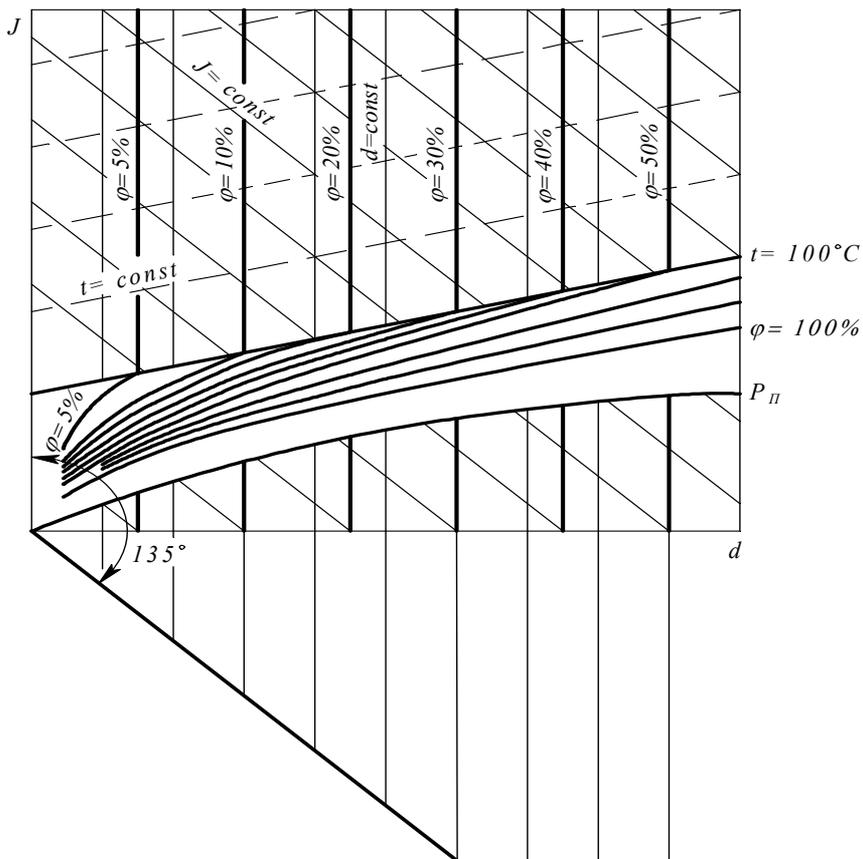


Рис. 6.1.  $Id$ -диаграмма для влажного воздуха

В принятых координатах на  $Id$ -диаграмму нанесены изотермы – линии постоянных температур при разных значениях  $I$  и  $d$ . Угол наклона изотерм несколько возрастает за счет увеличения теплоемкостей сухого воздуха  $C_b$  и водяного пара  $C_n$  с повышением температуры. Построение изотерм производится с использованием уравнения (4.39):

$$I = (C_b + 0,001 d C_n) t + 2,5d.$$

Линии парциального давления водяного пара во влажном воздухе однозначно определяются влагосодержанием согласно уравнению (4.17):

$$P_{\text{п}} = Bd/(622 + d).$$

Задаваясь различными значениями влагосодержаний  $d$ , можно получить соответствующие значения парциальных давлений водяного пара  $P_{\text{п}}$ . Выбрав определенный масштаб для парциальных давлений, в нижней части диаграммы в прямоугольной системе координат строят кривую  $P_{\text{п}} = f(d)$ .

Для нанесения на диаграмму линии  $\varphi = 100\%$  для каждой из принятых температур в интервале от 0 до  $90^\circ$  определяют величину максимального влагосодержания  $d_{\text{н}}$ . Точка на данной изотерме, соответствующая величине  $d_{\text{н}}$ , будет лежать на линии насыщения сухого воздуха влажным паром. Соединив эти точки, получим линию  $\varphi = 100\%$ .

Построение на  $Id$ -диаграмме линий постоянных относительных влажностей при  $\varphi < 100\%$  производится путем определения парциального давления водяного пара для принятых величин относительных влажностей по формуле

$$P_{\text{п}} = \varphi P_{\text{н}}/100.$$

На  $Id$ -диаграмме линии  $\varphi = \text{const}$  имеют вид пучка расходящихся кривых. При достижении температуры кипения воды (при  $B = 99,325$  кПа;  $t = 99,4$  °С), когда парциальное давление сухого воздуха становится равным нулю  $P_{\text{в}} = 0$ , а  $P_{\text{н}} = B$ , линии относительной влажности имеют резкий перелом. Выше температуры кипения они изображаются прямыми, почти параллельными линиям  $d = \text{const}$ .

Линия насыщения  $\varphi = 100\%$  делит диаграмму на две части. В верхней части, расположенной над линией  $\varphi = 100\%$ , воздух находится в ненасыщенном состоянии. Область диаграммы, расположенная ниже линии  $\varphi = 100\%$ , характеризует пересыщенный воздух, в котором влага может находиться в виде тумана. Вместе с тем линия  $\varphi = 100\%$  показывает максимально возможное насыщение воздуха влагой при данной температуре.

На  $Id$ -диаграмму также наносят линии постоянных температур мокрого термометра  $t_{\text{м}} = \text{const}$ , которые имеют наклон, близкий к наклону линий энтальпий.

Показанная  $Id$ -диаграмма для влажного воздуха позволяет определять любые его параметры ( $I$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $t_{\text{м}}$ ,  $\varphi$ ,  $P_{\text{п}}$ ), если известны два из них. По известным параметрам находят положение точки, которое будет характеризовать состояние влажного воздуха. С помощью нанесенных на  $Id$ -диаграмму линий и шкал определяют другие неизвестные параметры, соответствующие положению точки.

*Id*-диаграмма позволяет наглядно строить различные процессы, связанные с расчетом сушильной установки (приложения 1, 2).

## 6.2. Использование *Id*-диаграммы для построения теоретического процесса сушки

При нагревании влажного воздуха в калорифере (теплообменнике) его относительная влажность  $\varphi$  уменьшается, а влагосодержание  $d$  остается постоянным ( $d_0 = d_1$ ). Поэтому на *Id*-диаграмме процесс нагревания изображают отрезком *AB* из начальной точки ( $t_0, \varphi_0$ ) вертикальной линией  $d = \text{const}$  до пересечения с изотермой  $t_1 = \text{const}$  (температурой нагрева). Процесс охлаждения характеризуется прямой *BC* (до пересечения с  $\varphi = 100\%$ ). Точка *C* указывает температуру точки росы ( $t_p = \text{const}$ ). Дальнейшее охлаждение проходит по линии  $\varphi = 100\%$  до точки *E*, определяемой пересечением с изотермой  $t_E = \text{const}$  ( $t_E$  – температура, до которой охлаждается воздух) (рис. 6.2).

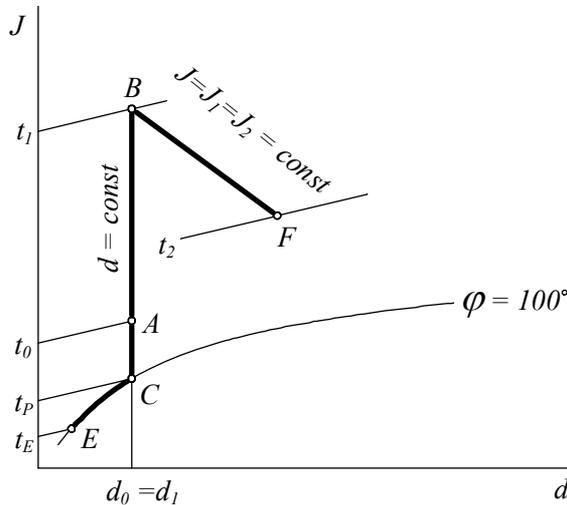


Рис. 6.2. Построение процесса сушки на *Id*-диаграмме для теоретической сушки

При адиабатической сушке (отсутствует теплообмен с внешней средой) влага из материала испаряется только за счет тепла, передаваемого материалу воздухом. При этом температура высушиваемого материала не изменяется и равна  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Поэтому энтальпия воздуха после сушки  $I_2$  равна энтальпии  $I_1$  перед сушкой. Одновременно понижается температура и увеличивается влагосо-

держание  $d$  и относительная влажность  $\varphi$ . Такой процесс называется *теоретическим* процессом сушки ( $I_2 = I_1 = \text{const}$ ) (линия  $ABF$ ).

Для сушильной практики большое значение имеет адиабатический процесс испарения со свободной поверхности жидкости, сходный с процессом испарения с поверхности влажного материала в начальный период сушки.

После достижения равновесия между влажным воздухом и испаряющейся влагой температура последней примет постоянное значение, равное *температуре мокрого термометра* –  $t_M$ .

Изменение состояния воздуха (температуры, влагосодержания и относительной влажности) при адиабатическом процессе испарения влаги со свободной поверхности жидкости происходит по линии  $t_M = \text{const}$ . Разность между температурой воздуха  $t_B$  и температурой мокрого термометра  $t_M$  характеризует способность воздуха поглощать влагу из материала и носит название *потенциала сушки*:

$$\varepsilon = t_B - t_M . \quad (6.1)$$

Когда воздух полностью насыщается влагой, величина  $\varepsilon$  равна нулю ( $t_B = t_M$ ).

### **6.3. Основные уравнения и построение действительного процесса сушки на $Id$ -диаграмме для сушилke с однократным использованием сушильного агента**

Подогрев воздуха и сушка производятся в различных частях сушильного аппарата – подогрев в калорифере или топке, сушка в сушилке.

Обозначим:

$$\Delta = q_d + \vartheta_1 C_{вд} - (q_3 + q_4 + q_5), \text{ кДж/кг исп. влаги.} \quad (6.2)$$

Это уравнение представляет собой внутренний тепловой баланс с однократным использованием воздуха без учета роли воздуха как теплоносителя.

В действительной сушилке могут встретиться три случая:

а) при  $\Delta = 0$

$$q_d + \vartheta_1 C_{вд} = q_3 + q_4 + q_5, \quad (6.3)$$

т.е. потери тепла компенсируются количеством дополнительно введенного тепла; при этом  $\Delta = \ell(I_2 - I_1) = 0$ . Так как  $\ell \neq 0$ , то  $I_2 = I_1 = \text{const}$  и процесс идет при постоянной энтальпии, как и в теоретической сушилке;

б) при  $\Delta < 0$

$$q_d + \vartheta_1 C_{вд} < q_3 + q_4 + q_5, \quad (6.4)$$

т.е.  $\Delta \ell(I_2 - I_1) < 0$ . Откуда  $I_1 > I_2$ ;

в) при  $\Delta > 0$   $I_1 < I_2$ .

Поправка на действительную сушилку  $\Delta$  определяется по (5.46), а удельный расход сушильного агента – по (5.14):

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_1}.$$

Подставив (5.14) в (5.46), получим:

$$\Delta = \frac{I_2 - I_1}{d_2 - d_1} \cdot 1000.$$

Для произвольной точки  $E_0$  (рис. 6.3) с координатами  $I$  и  $d$ , расположенной на линии действительного процесса  $BC$ , можно из предыдущего уравнения написать:

$$\Delta = \frac{I - I_1}{d - d_1} \cdot 1000. \quad (6.5)$$

Согласно с построением процесса сушки на  $Id$ -диаграмме запишем:

$$I - I_1 C_0 E_0 M_I \text{ и } d - d_1 = C_0 D_0 M_d,$$

откуда

$$\Delta = \frac{C_0 E_0 M_I}{C_0 D_0 M_d} \cdot 1000, \quad (6.6)$$

где  $M_I$ ,  $M_d$  – масштабы энтальпий и влагосодержания для данной  $I$ - $d$ -диаграммы.

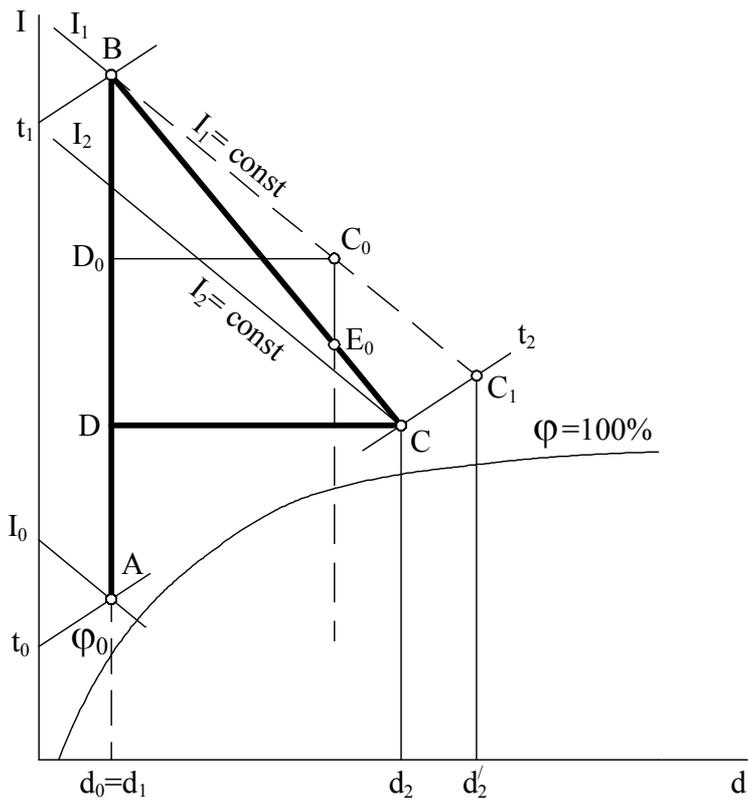


Рис. 6.3. Построение процесса сушки на  $I$ - $d$ -диаграмме для действительной сушилки при  $\Delta < 0$

Построение  $Id$ -диаграммы действительного процесса сушки при наличии тепловых потерь ( $\Delta < 0$ ) начинается с построения теоретического процесса  $I_1 = \text{const}$ . Затем на линии  $I_1 = \text{const}$  теоретического процесса выбирается произвольная точка  $C_0$  и от нее вниз откладывается отрезок (см. рис. 6.3):

$$C_0E_0 = \frac{\Delta \cdot C_0 D_0}{1000} \cdot \frac{M_d}{M_I} . \quad (6.7)$$

Величина  $\Delta$  рассчитывается по формуле

$$\Delta = q_d + \vartheta_1 C_{вд}(q_3 + q_4 + q_5). \quad (6.8)$$

Из точки  $B$  через точку  $E_0$  проводится линия действительного процесса. На этой линии находится конечная точка  $C$  действительного процесса при пересечении с линиями постоянной относительной влажности или температуры, соответствующих состоянию воздуха на выходе из сушилки (например, с изотермой  $t_2 = \text{const}$ ).

При  $\Delta > 0$  линия процесса сушки действительной сушилки выше  $I_1 = \text{const}$ . Различие в том, что величину  $C_0E_0 = \frac{\Delta \cdot C_0 D_0}{1000} \frac{M_d}{M_I}$  откладывают вверх от точки  $C_0$ , а не вниз.

Удельный расход сухого сушильного агента

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{CD \cdot Md} , \text{ кг/кг исп. влаги.} \quad (6.9)$$

Удельный расход тепла в подогревателе

$$q = \ell(I_1 - I_0) = \frac{AB}{CD} \cdot \frac{M_I}{Id} \cdot 1000, \text{ кДж/кг исп. влаги.} \quad (6.10)$$

Если обозначить через масштабный коэффициент

$$m = \frac{M_I}{M_d} 1000 ,$$

$$\text{то } q = \frac{AB}{CD} m . \quad (6.11)$$

#### 6.4. Сушилки с внутренним подогревом и замкнутой циркуляцией воздуха

В данной схеме сушки отработанный воздух после сушилки с параметрами  $t_2, \varphi_2, I_2, d_2$  не выбрасывается в атмосферу, а направляется в скруббер, предназначенный для охлаждения воздуха и конденсации части содержащегося в нем водяного пара (рис. 6.4).

При выходе из скруббера воздух имеет предельное насыщение  $\varphi = 100\%$ , но намного меньшее влагосодержание. Для снижения относительной влажности и приобретения сушильной способности воздух направляется в калорифер, где подогревается до требуемой температуры. Затем с параметрами  $t_1, \varphi_1, I_1, d_1$  вновь подается в сушилку. Основное тепло, расходуемое в процессе сушки, подводится непосредственно в сушилку в виде насыщенного пара. В процессе сушки влагосодержание воздуха возрастает. При заданных параметрах воздуха на входе в сушилку  $t_1$  и  $\varphi_1$  его охлаждение в скруббере производится до такой температуры, при которой достигается требуемое влагосодержание  $d_1$ .

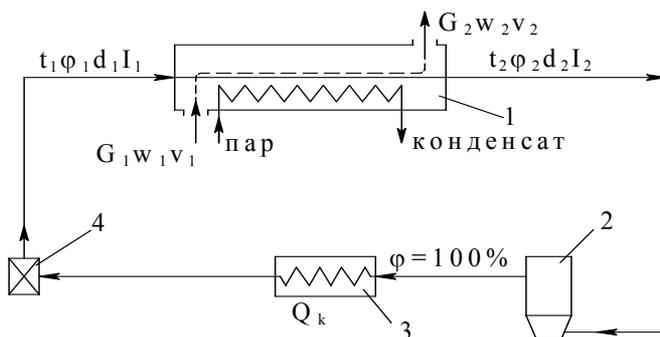


Рис. 6.4. Схема процесса сушки в сушилке с внутренним подогревом и замкнутой циркуляцией воздуха:  
1 – сушилка, 2 – скруббер, 3 – калорифер, 4 – вентилятор

Построение процесса сушки на  $I$ - $d$ -диаграмме производится следующим образом (рис. 6.5).

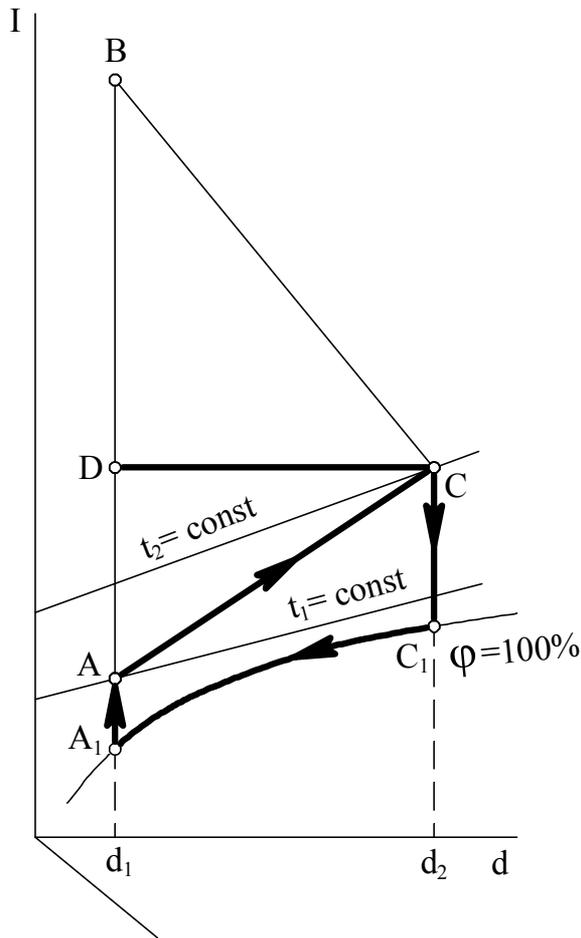


Рис. 6.5. Построение процесса сушки в сушилке с внутренним подогревом на  $I$ - $d$ -диаграмме

По известным параметрам воздуха до и после сушки наносятся начальная ( $A$ ) и конечная ( $C$ ) точки. Процесс сушки протекает по линии  $AC$  с возрастанием температуры и влагосодержания воздуха. Точка  $C$  характеризует его состояние на выходе из сушилки с параметрами  $t_2$ ,  $\phi_2$ ,  $d_2$ ,  $I_2$ . Процесс охлаждения воздуха в

скруббере совершается в два этапа. В начале снижение температуры происходит при  $d_2 = \text{const}$  до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$ . При достижении точки росы в точке  $C_1$  влажный газ становится насыщенным и его дальнейшее охлаждение сопровождается конденсацией водяного пара. Этот процесс будет идти по линии  $\varphi = 100\%$  и закончится в точке  $A_1$  при достижении заданного влагосодержания  $d_1$  и температуры насыщения  $t_n$ . В калорифере насыщенный воздух подогревается до температуры  $t_1$ , относительная влажность снижается от  $\varphi = 100\%$  до значения  $\varphi_1$ . Процесс подогрева происходит по линии  $A_1A$  при  $d_1 = \text{const}$ . С параметрами  $t_1, \varphi_1, d_1, I_1$  воздух направляется в сушилку.

Таким образом, рабочий процесс сушки в данном типе сушилок изображается ломаной линией  $ACC_1A_1A$ , где  $AC$  – процесс сушки,  $CC_1A_1$  – процесс охлаждения воздуха в скруббере,  $A_1A$  – процесс его подогрева в калорифере.

Количество циркулирующего сухого воздуха

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{CD \cdot Md}, \text{ кг/кг исп. влаги.}$$

Расход тепла на процесс сушки:

$$q = q_k + q_g, \text{ кДж/кг исп. влаги.} \quad (6.12)$$

Расход тепла в калорифере:

$$q_k = \ell (I_1 - I_{\text{скр}}), \quad (6.13)$$

где  $I_{\text{скр}}$  – энтальпия воздуха на выходе из скруббера.

Дополнительный расход тепла можно определить из уравнения

$$q_g = \ell(I_2 - I_1) + \sum q_{\text{п}} - \vartheta_1 \cdot C_{\text{вд}}, \quad (6.14)$$

$$q = q_k + q_g = \ell(I_1 - I_{\text{скр}}) + \ell(I_2 - I_1) + \sum q_{\text{п}} - \vartheta_1 \cdot C_{\text{вд}},$$

$$q = \ell(I_2 - I_{\text{скр}}) + \sum q_{\text{п}} - \vartheta_1 \cdot C_{\text{вд}},$$

$$q = m \frac{A_1 B}{CD} + \sum q_{\text{п}} - \vartheta_1 \cdot C_{\text{вд}}. \quad (6.15)$$

### 6.5. Сушилки с рециркуляцией

Сушилки, работающие с рециркуляцией воздуха или газов, имеют большое применение в промышленности. Это сушилки, в которых отработавший воздух частично возвращается для повторного использования. При выходе из сушилки отработавший влажный воздух с параметрами, соответствующими точке  $C$ , разветвляется, часть воздуха выпускается в атмосферу, а другая идет к вентилятору. Вместо выброшенного воздуха подается такое же количество свежего воздуха с параметрами точки  $A$ . Смесь воздуха с параметрами, соответствующими точке  $M$  нагревается в калорифере до состояния, характеризуемого точкой  $B_1$ , и поступает в сушилку. По выходе из сушилки поток снова разветвляется и т.д. На  $Id$ -диаграмме процесс такой сушилки изображается линией  $AMB_1CM$  (рис. 6.6). Расходы сухого свежего и уходящего из сушилки отработавшего воздуха для такой сушилки равны и определяются формулой

$$\ell = \frac{1000}{DC \cdot Md} = \frac{1000}{d_2 - d_0}, \text{ кг/кг исп. влаги,}$$

так как всю испаренную влагу уносит только отработавший воздух.

Количество циркулирующего воздуха в сушилке определяется из условия, что 1 кг смеси увеличивает в сушилке влагосодержание с  $d_{\text{см}}$  до  $d_2$ , т.е.

$$\ell_{\text{ц}} = \frac{1000}{d_2 - d_{\text{см}}} = \frac{1000}{D_1 C \cdot Md}, \text{ кг/кг исп. влаги.} \quad (6.16)$$

Так как  $\frac{AB}{DC} = \frac{MB_1}{D_1 C}$ , то удельный расход теплоты

$$q = \ell(I_1 - I_0), \text{ кДж/кг исп. влаги.} \quad (6.17)$$

Рециркуляция применяется при сушке керамических изделий, древесины и изделий из нее, требующих во избежание растрескивания сушимых изделий большого содержания влаги в сушильном агенте. Применение рециркуляции

позволяет вести сушку при высоких влагосодержаниях сушильного агента без расхода электроэнергии на его увлажнение. Применение рециркуляции не дает экономии тепла, так как треугольники  $ABC$  и  $MB_1C$  подобны.

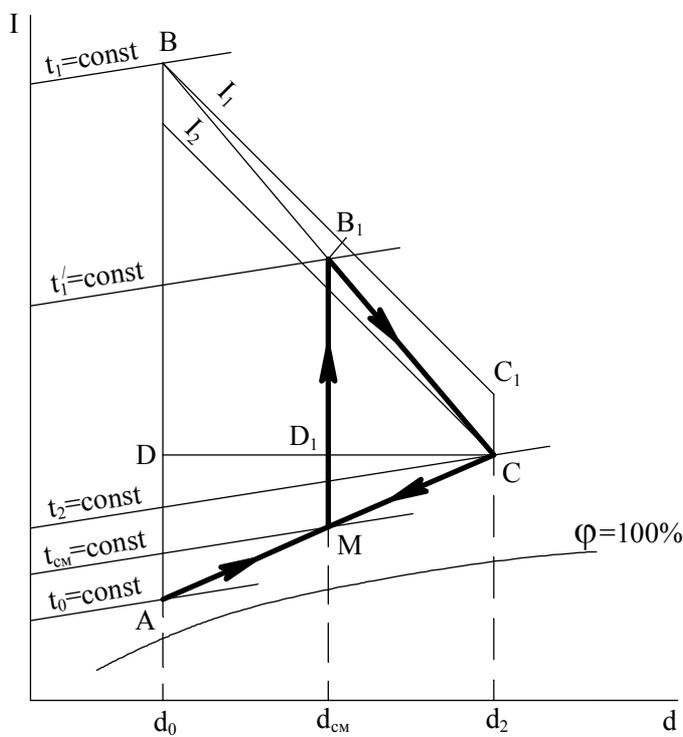


Рис. 6.6. Построение процесса сушки в сушилке с рециркуляцией на  $I$ - $d$ -диаграмме

### 6.6. Сушилки с промежуточным подогревом

Сушилка с промежуточным подогревом воздуха состоит из нескольких зон, в каждой из которых воздух осуществляет простой сушильный процесс, подогреваясь на промежуточных поверхностях нагрева  $H_1, H_2, H_3$  до требуемых начальных температур  $t_1', t_1'', t_1'''$  или до одной и той же температуры  $t_1$  (рис. 6.7).

Общее удельное количество сухого сушильного агента, необходимого для осуществления сушки в нескольких зонах, определится из выражения

$$\ell = \frac{1000}{(C_1 D_1 + C_2 D_2 + C_3 D_3)} = \frac{1000}{D_1 C_3 \cdot M_d}, \text{ кг/кг исп. влаги,} \quad (6.18)$$

где  $M_d$  – масштабный коэффициент по оси  $d$ .

Удельный расход теплоты на процесс сушки в сушилке с промежуточным подогревом

$$q = \frac{AB \cdot M_I \cdot 1000}{D_1 C_3 \cdot M_d}, \text{ кДж/кг исп. влаги,} \quad (6.19)$$

где  $AB = AB_1 + C_1 B_2 + C_2 B_3$ ;

$M_I$  – масштабный коэффициент по оси  $I$ .

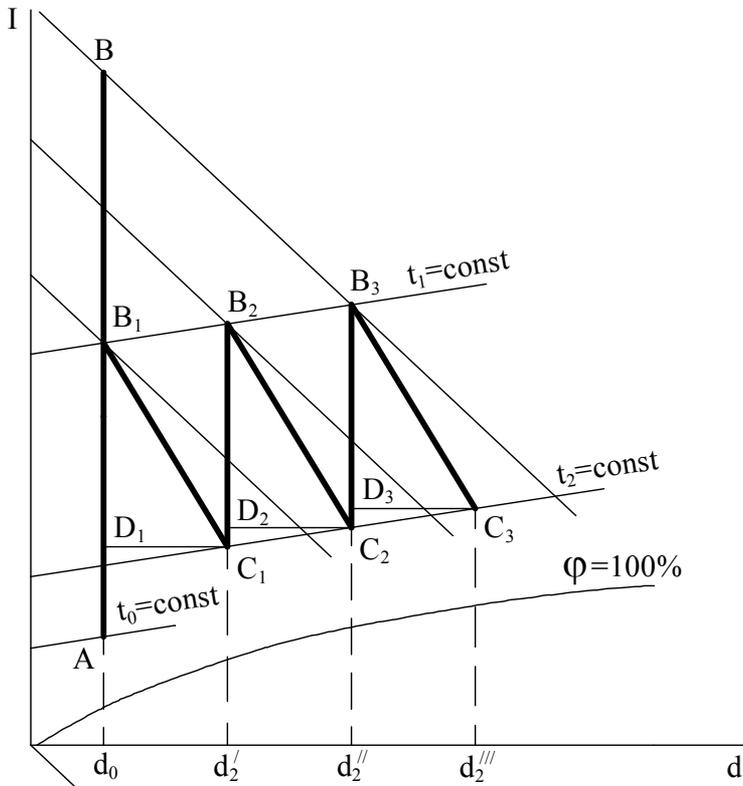


Рис. 6.7. Построение процесса сушки в сушилке с промежуточным подогревом на  $Id$ -диаграмме

## 7. СУШКА МАТЕРИАЛОВ ДЫМОВЫМИ (ТОПОЧНЫМИ) ГАЗАМИ

### 7.1. Элементный состав топлива. Теплота сгорания

Этот вид сушки материалов получил широкое распространение. Газы генерируются в технологических топках. Для получения нужной температуры сушки продукты сгорания топлива часто разбавляют наружным воздухом или смесью воздуха с отработанными газами. При сжигании топлива благодаря содержанию в нем воды, а также образованию добавочной влаги за счет водорода топлива влагосодержание дымовых газов оказывается более высоким, чем наружного воздуха, нагретого до той же температуры.

Параметры дымовых газов определяются качеством топлива, сжигаемого в топке, и условиями горения. При полном сгорании горючей части топлива топочные газы состоят из кислорода, азота, углекислого газа  $\text{CO}_2$ , сернистого ангидрида  $\text{SO}_2$  и водяного пара. Качество топлива характеризуется элементным составом.

Топливо (торф, бурый уголь, каменный уголь, антрацит, дрова, сланцы и др.) состоит из: С (углерод) + Н (водород) + О (кислород) + N (азот) + S (сера) + W (вода) + A (зола). (7.1)

Для характеристики топлива различают его органическую, горючую, сухую и рабочую массы. Каждой из них присваивается индекс: органическая масса – О, горючая – Г, сухая – С, рабочая – Р. Состав органической массы:

$$\text{C}^{\text{O}} + \text{H}^{\text{O}} + \text{O}^{\text{O}} + \text{N}^{\text{O}} + \text{S}^{\text{O}} = 100 \%. \quad (7.2)$$

Состав горючей массы:

$$\text{C}^{\text{Г}} + \text{H}^{\text{Г}} + \text{O}^{\text{Г}} + \text{S}^{\text{Г}} = 100 \%. \quad (7.3)$$

Состав сухой массы:

$$\text{C}^{\text{С}} + \text{H}^{\text{С}} + \text{O}^{\text{С}} + \text{N}^{\text{С}} + \text{S}^{\text{С}} + \text{A}^{\text{С}} = 100 \%. \quad (7.4)$$

Состав рабочей массы:

$$\text{C}^{\text{Р}} + \text{H}^{\text{Р}} + \text{O}^{\text{Р}} + \text{N}^{\text{Р}} + \text{S}^{\text{Р}} + \text{A}^{\text{Р}} + \text{W}^{\text{Р}} = 100\%. \quad (7.5)$$

Обычно элементный состав топлива характеризуется пересчетом на горючую массу, а для технологических целей необходимо учитывать зольность топлива  $A^c$  и его влажность  $W^p$ . Поэтому необходимо производить пересчет элементного состава на рабочее топливо (рабочую массу) по следующим формулам:

зольность

$$A^p = \frac{A^c(100 - W^p)}{100}, \%, \quad (7.6)$$

углерод

$$C^p = \frac{C^g(100 - W^p - A^p)}{100}, \%, \quad (7.7)$$

водород

$$H^p = \frac{H^g(100 - W^p - A^p)}{100}, \% \text{ и т.д.} \quad (7.8)$$

Аналогично делают расчет для кислорода  $O^p$ , азота  $N^p$  и серы  $S^p$ .

Основными горючими элементами для топлив (каменный и бурый уголь, торф, сланцы, дрова и т.п.) являются углерод и водород. Удельная низшая теплота сгорания углерода составляет 34000 кДж/кг, а водорода – 278000 кДж/кг. Хотя сера также является горючим элементом и ее удельная теплота сгорания составляет 9300 кДж/кг, она является вредным компонентом топлива. Продукты сгорания серы вызывают коррозию оборудования и отравляют окружающий воздух. Сера составляет, как правило, незначительный процент топлива. Кислород и азот, содержащиеся в топливе, представляют балласт. За счет связывания кислородом части водорода уменьшается теплота сгорания топлива. Азот при горении выделяется в газообразном состоянии.

Элементный состав топлива позволяет рассчитать теплоту сгорания, которая является важнейшей его характеристикой. Различают высшую и низшую теплоту сгорания. Высшей теплотой сгорания топлива  $Q_B^p$  называется количество теплоты, выделяемой при полном сгорании единицы массы, включая теплоту водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания. Так как эта теплота может быть выделена только при конденсации, то практически использовать ее обычно трудно, поэтому применяют так называемую низшую теплоту сго-

рания  $Q_H^p$ . Ее величина меньше высшей теплоты сгорания на количество теплоты парообразования влаги, содержащейся в топливе, а также влаги, образующейся при его сжигании.

Высшая удельная теплота сгорания топлива определяется по формуле Менделеева Д.И.:

$$\begin{aligned} Q_B^p &= 4,19 [81 C^p + 300 H^p - 26(O^p - S^p)] = \\ &= 340 C^p + 1256 H^p - 109(O^p - S^p), \text{ кДж/кг.} \end{aligned} \quad (7.9)$$

Так как при сгорании одной части водорода  $H^p$  образуется девять частей воды  $W^p$ , то количество водяного пара, получаемого при сжигании топлива, составит  $(9H^p + W^p)$  процентов от сожженного топлива. Если теплоту парообразования принять равной 2501 кДж/кг, то расход теплоты на испарение влаги и образование пара составит:

$$\frac{2501(9H^p + W^p)}{100}.$$

Низшая удельная теплота сгорания определится из выражения

$$Q_H^p = Q_B^p - 25,01(9H^p + W^p), \text{ кДж/кг.} \quad (7.10)$$

Расчет теоретически необходимого количества воздуха для полного сгорания топлива ведется исходя из уравнений горения, т.е. уравнений химических реакций. Например, для горения углерода  $C + O_2 = CO_2$  на 12 кг С требуется 32 кг  $O_2$ , что в сумме составляет 44 кг  $CO_2$ . То же при горении водорода по формуле  $2H_2 + O_2 = 2H_2O$  получается 4 кг  $H_2 + 32$  кг  $O_2 = 36$  кг  $H_2O$ .

Исходя из принятых соотношений, определяют теоретическое количество абсолютно сухого воздуха (кг), необходимого для сгорания 1 кг топлива:

$$L_0 = 0,115 C^p + 0,345 H^p - 0,043 (O^p - S^p). \quad (7.11)$$

Во избежание потерь топлива от неполноты сгорания процесс ведется с некоторым избытком воздуха. В действительности масса воздуха, поступающего в топку на 1 кг сжигаемого топлива  $L_d$ , всегда больше теоретически необходи-

мого. Величина  $\alpha_T = L_d/L_0$  называется коэффициентом избытка воздуха в топке.

Коэффициент избытка воздуха выбирается в зависимости от вида топлива, способа сжигания и конструкции топки. Для твердого топлива при слоевом сжигании или сжигании во взвешенном состоянии  $\alpha_T = 1,25 \dots 1,50$ .

Кроме воздуха, необходимого для горения топлива, часто топочные газы смешивают с атмосферным воздухом для понижения температуры до заданных пределов по условиям сушки. Поэтому при тепловом расчете сушилки устанавливается общий коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Масса сухих газов (кг), образуемых при полном сгорании 1 кг топлива, составляет:

$$M_{\Gamma} = 1 + \alpha L_0 - \frac{(A^P + 9H^P + W^P)}{100}. \quad (7.12)$$

Масса водяного пара (кг), содержащегося в продуктах сгорания 1 кг топлива, складывается из массы водяного пара, полученного при сжигании топлива, и массы водяного пара, поступившего в точку вместе с воздухом, т.е.

$$M_{\Pi} = \frac{(9H^P + W^P)}{100} + \alpha L_0 \cdot \frac{d_0}{1000}, \quad (7.13)$$

где  $d_0$  – влагосодержание воздуха, применяемого для подачи в топку.

Влагосодержание топочных газов при полном сгорании топлива

$$d = \frac{1000 M_{\Pi}}{M_{\Gamma}} = \frac{1000[(9H^P + W^P)/100 + L_0 d_0 / 1000]}{1 + \alpha L_0 - (A^P + 9H^P + W^P)100}. \quad (7.14)$$

## 7.2. *Id*-диаграмма для дымовых (топочных) газов

*Id*-диаграмма, построенная для воздуха, с достаточной технической точностью может быть применена и для дымовых газов.

При сушке дымовыми газами процесс подогрева отсутствует, он заменяется процессом сгорания топлива. Калорифер, используемый для подогрева возду-

ха, в этом случае заменяется топкой. Благодаря содержанию в топливе влаги, а также ее образованию при сгорании водорода топлива, влагосодержание дымовых газов оказывается более высоким, чем наружного воздуха, нагретого до такой же температуры.

Дымовые газы, получаемые в топках, имеют высокую температуру и часто не могут быть использованы для сушки различных материалов без предварительного разбавления наружным воздухом. В зависимости от требуемой температуры на входе в сушилку к дымовым газам добавляется то или иное количество воздуха (рис. 7.1).

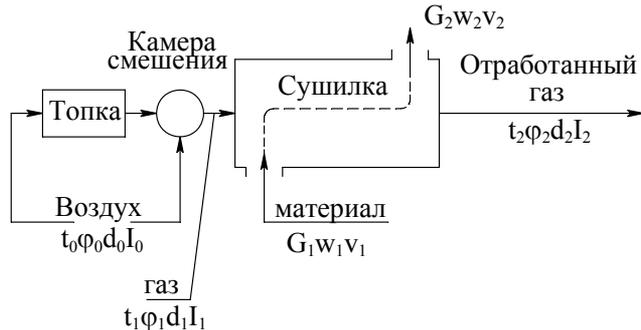


Рис. 7.1. Теплофизическая схема сушки материала дымовыми газами

Если при использовании воздуха в качестве агента сушки точка *A* на *Id*-диаграмме (см. предыдущие рисунки) определяет его параметры перед поступлением в калорифер, то при расчете сушилки на дымовых газах точка *A* характеризует параметры наружного воздуха при подаче его в топку и камеру смешения. Для воздуха точка *B* определится как место пересечения изотермы  $t_1$  с вертикальной линией  $d_0 = d_1 = \text{const}$ , так как процесс нагрева сушильного агента происходит при постоянной температуре. Для дымовых газов при той же температуре точка *B* расположится на изотерме  $t_1$  правее в соответствии со значением их влагосодержания  $d_1$ .

Расход сухих топочных газов и воздуха на испарение 1 кг влаги мало отличаются друг от друга. Обычно этой погрешностью (не более 2%) пренебрегают.

Расчет процесса смешения значительно упрощается при использовании для этой цели *Id*-диаграммы (рис. 7.2).

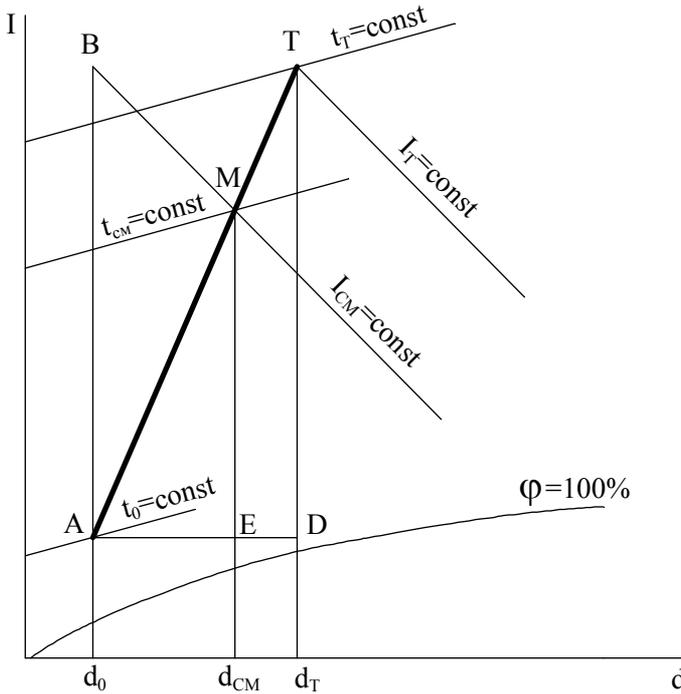


Рис. 7.2. Построение линии смешения воздуха с дымовыми газами на  $Id$ -диаграмме

Состояние наружного воздуха с параметрами  $t_0$  и  $d_0$  на  $Id$ -диаграмме для обычной сушилки определяется положением точки  $A$ . Соответственно состояние дымовых топочных газов с параметрами  $t_T$  и  $d_T$  на входе в смесительную камеру характеризуется положением точки  $T$ . Линию  $AT$  следует рассматривать как геометрическое место точек, характеризующих смесь, состоящую из 1 кг сухих топочных газов и  $n$  кг сухого воздуха. Любая точка  $M$ , взятая на этой прямой, будет иметь текущие координаты  $d_{CM}$  и  $I_{CM}$ , характеризующие параметры смеси.

Графически содержание смеси определяется соотношением пропорциональных отрезков

$$n = TM/AM = ED/AE \text{ или } n = (AT - AM)/AM.$$

Таким образом, зная параметры точки  $M$ , можно определить кратность смешения воздуха и дымовых газов  $n$  и, наоборот, по величине  $n$  легко находится положение точки  $M$ . При уменьшении величины  $n$  точка  $M$  перемещается ближе к точке  $T$ , т.е. количество добавочного воздуха в смеси уменьшается и в точке  $T$  оно равно нулю. При  $n = 0$  вся смесь состоит только из дымовых топочных газов.

Так как положение точки  $M$  на линии  $AT$  характеризует параметры  $d_{см}$  и  $I_{см}$ , то из известного уравнения  $\ell = 1000/(d_2 - d_1)$  следует, что чем больше  $d_2 = d_{см}$ , тем меньше удельный расход сухих дымовых газов  $\ell$ . Это возможно при наибольших температурах  $t_{см}$ . Следовательно, сушка при максимальных температурах дымовых топочных газов экономически наиболее целесообразна.

При сжигании топлива разной влажности линии смешения воздуха с дымовыми газами представляют собой пучок расходящихся прямых из точки  $A$ . Для одинаковой температуры дымовых газов положение точки  $T$  на каждом луче, изображенном на  $Id$ -диаграмме, будет определяться влагосодержанием. Чем влажнее топливо, тем больше влагосодержание получаемых из него дымовых газов и тем больший наклон имеют линии смешения их с наружным воздухом. С увеличением рабочей влажности топлива ( $W_1 < W_2 < W_3 < W_4 \dots$ ) будет возрастать влагосодержание и точка  $T$  на линии смешения будет перемещаться по расчетной изотерме  $t_1$  вправо (рис. 7.3).

При сжигании топлива часть теплоты дымовых топочных газов расходуется на испарение содержащейся в нем влаги, в результате чего увеличивается их влагосодержание. При этом удельная энтальпия остается неизменной, поскольку водяной пар, содержащий теплоту парообразования, поглощается теми же газами. При повышении влажности топлива возрастает балластная часть энтальпии и уменьшается ее активная составляющая, участвующая в процессе теплообмена. Это сопровождается снижением температуры топочных газов. При  $I = \text{const}$  увеличение влагосодержания  $d$  возможно только за счет соответствующего снижения температуры  $t$  согласно уравнению  $I = C_{см} t + 2,5d$ , что в целом приводит к снижению экономичности сушки.

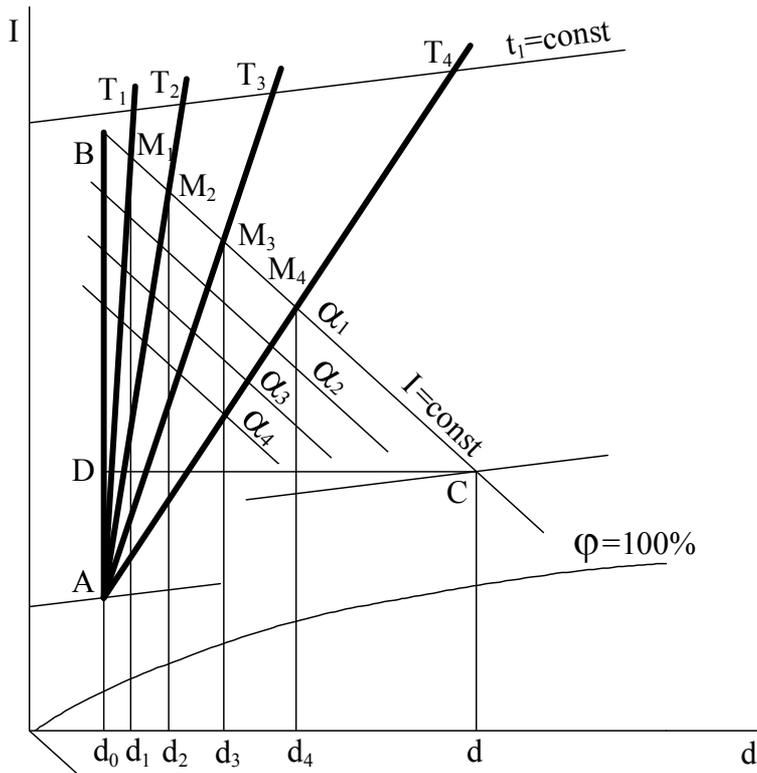


Рис. 7.3. Линии смешения воздуха с дымовыми газами, полученными при сжигании топлива разной влажности

Энтальпия дымовых топочных газов не зависит от влажности топлива и в основном определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ . При  $\alpha = 1$ , т.е. при теоретическом горении топлива, удельная энтальпия газов будет максимальной, поэтому на  $Id$ -диаграмме линия  $\alpha = 1$  совпадает с линией  $I_{\max} = \text{const}$ . При других значениях  $\alpha$  ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  и т.д.), которые всегда больше единицы, линии  $\alpha_i = \text{const}$  располагаются параллельно линиям  $I = \text{const}$ . С возрастанием коэффициента избытка воздуха линии  $\alpha = \text{const}$  будут приближаться к точке  $A$ . Линии смешения в этом случае представляют состояние дымовых топочных газов при различных коэффициентах избытка воздуха  $\alpha$ .

## 8. КЛАССИФИКАЦИЯ И УСТРОЙСТВО СУШИЛОК

Таблица 8.1

Классификация сушилок

Признак классификации	Тип сушилки
По способу подвода тепла к материалу	Конвективная, контактная, радиационная (сушка инфракрасными лучами, электрическая сушка в электрическом поле)
По способу действия	Периодического действия, непрерывная
По давлению в рабочем пространстве	Атмосферная, вакуумная, под давлением
Сушильный агент	Воздух, топочные газы, смесь воздуха с топочными газами, перегретый пар, инертные газы, насыщенный водяной пар
По направлению движения сушильного агента относительно материала	С прямотоком, противотоком, перекрестным током и реверсивная
По характеру циркуляции сушильного агента	С естественной и принудительной циркуляцией
По способу нагрева сушильного агента	С электронагревом, путем смешения с топочными газами, с паровыми и огневыми воздухонагревателями
По схеме нагрева сушильного агента	С централизованным подогревом, с подогревом индивидуальными агрегатами и с промежуточным подогревом

Анализ технических и экономических результатов показал, что для сушки горных пород наибольшее распространение получили сушилки с конвективным способом сушки неподвижного или движущегося плотного слоя материала в камерных, туннельных, ленточных, барабанных сушилках; сушилки кипящего (псевдооживленного) слоя; трубы-сушилки; высокочастотные сушилки и др.

## 8.1. Конвективные сушилки с неподвижным или движущимся слоем материала

### 8.1.1. Камерные сушилки

Эти сушилки предназначены для сушки различных сыпучих и волокнистых материалов, керамических изделий, пиломатериалов, стержней, опок, пасты и др.

Основной частью камерных сушилок является прямоугольная камера, внутри которой на специальных вагонетках или стеллажах размещается сушимый материал (рис. 8.1), остающийся обычно неподвижным в течение всего процесса сушки. Загрузка и выгрузка материала производится с одной стороны сушилки. Камерные сушилки являются установками периодического действия.

В камерных сушилках температура и влажность сушильного агента может изменяться во времени. Например, при сушке древесины, после того как влажность материала понизится до определенного значения, повышают температуру и снижают относительную влажность сушильного агента. Такое изменение режима в случае необходимости может осуществляться в процессе сушки несколько раз.

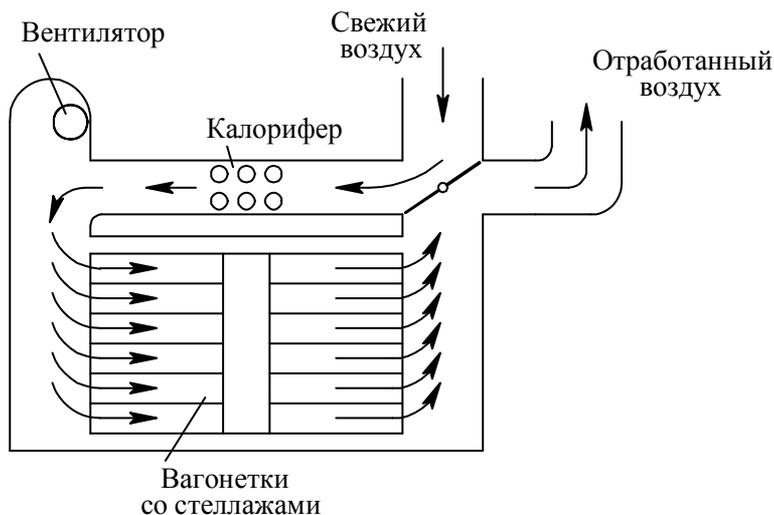


Рис. 8.1. Камерная сушилка

Эти сушилки работают в мягком режиме, могут иметь промежуточный подогрев, частичную рециркуляцию воздуха. Однако эти сушилки имеют низкую производительность и большую продолжительность сушки.

### 8.1.2. Туннельные сушилки

В туннельных сушилках, в отличие от камерных, сцепка из нескольких вагонеток медленно перемещается на рельсах вдоль очень длинной камеры (рис. 8.2).

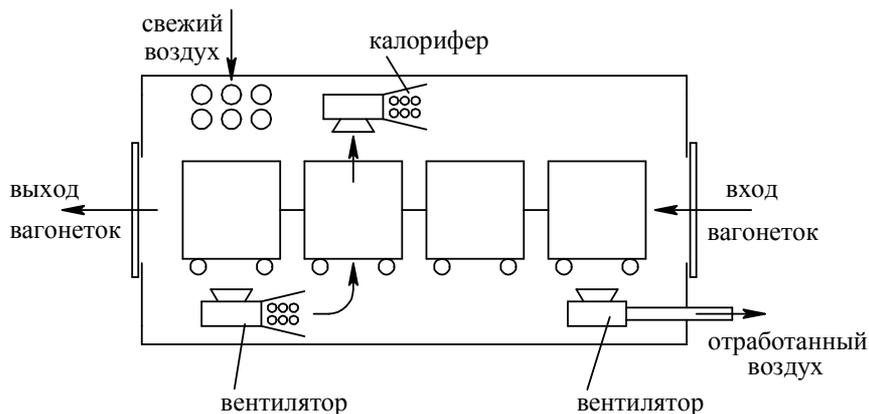


Рис. 8.2. Туннельная сушилка

Основной частью туннельных вагонеточных сушилок является удлиненная камера, внутри которой высушиваемый материал периодически перемещается на вагонетках. После того как из камеры выкатывается крайняя вагонетка с высушенным материалом, весь поезд продвигается вперед, а с другого конца вкатывается новая вагонетка с исходным материалом. Таким образом, загрузка и выгрузка материала производится с разных концов камеры сушилки. Длина сушильных камер достигает 60 м, а ширина 6 м. При проектировании камерных сушилок стремятся к тому, чтобы зазоры между вагонеткой, стенами и потолком были минимальными.

В туннельных сушилках при установившемся режиме работы температура и влажность сушильного агента изменяются по длине камеры по мере того, как сушильный агент, проходя над поверхностью материала, охлаждается, а влагосодержание его увеличивается. Циркуляция сушильного агента осуществляется в большей части за счет вентиляторов.

Туннельные сушилки, являющиеся сушилками непрерывного действия, в тепловом отношении более экономичны, чем камерные, так как расход тепла на прогрев ограждений сушильной камеры необходим только при пуске сушилки в работу. Кроме того, отработавшие газы имеют более высокое насыщение в течение всего периода работы.

### 8.1.3. Ленточные сушилки

В этих сушилках сушка материалов производится непрерывно при атмосферном давлении на одной несущей ленте или нескольких лентах.

На рис. 8.3 показано, что в сушильной камере имеется ряд конвейеров, на которые поступает высушиваемый материал. Сушка осуществляется горячим воздухом или топочными газами, которые движутся противотоком или перекрестным током к направлению движения материала.

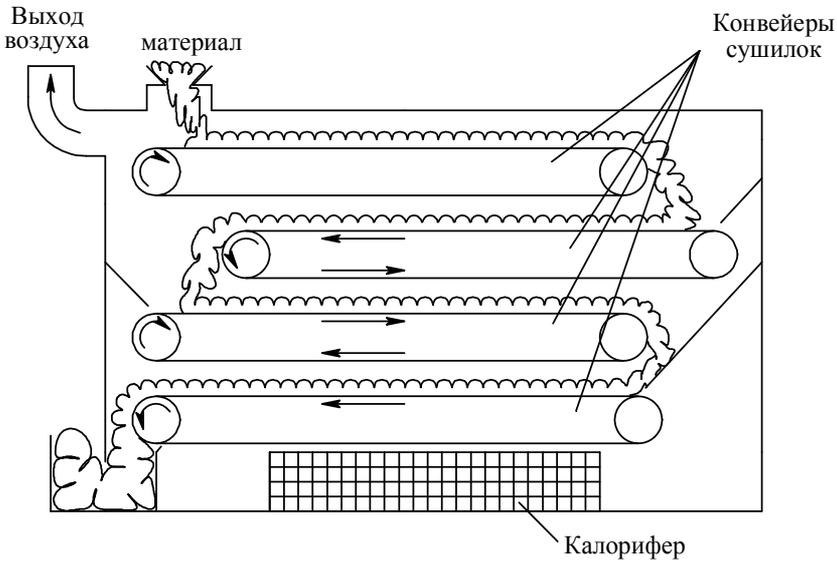


Рис. 8.3. Многоленточная сушилка

Более эффективно применение многоленточных сушилок с лентами из металлических сеток, в которых сушимый материал пересыпается с одной ленты на другую. Сушильный агент движется противотоком к движению материала. Могут быть различные варианты сушилок.

Недостатки ленточных сушилок заключаются в том, что они громоздки и сложны в обслуживании из-за перекосов и растяжек лент. Производительность их невелика, а удельные расходы тепла значительны.

## 8.2. Конвективные сушилки с перемешиванием слоя

*Барабанные сушилки* широко применяются для непрерывной сушки при атмосферном давлении кусковых, зернистых и сыпучих материалов (песка, глины, известняка, минеральных солей, фосфоритов, торфа, каменного и бурого угля и др.).

Схема барабанной сушилки изображена на рис. 8.4.

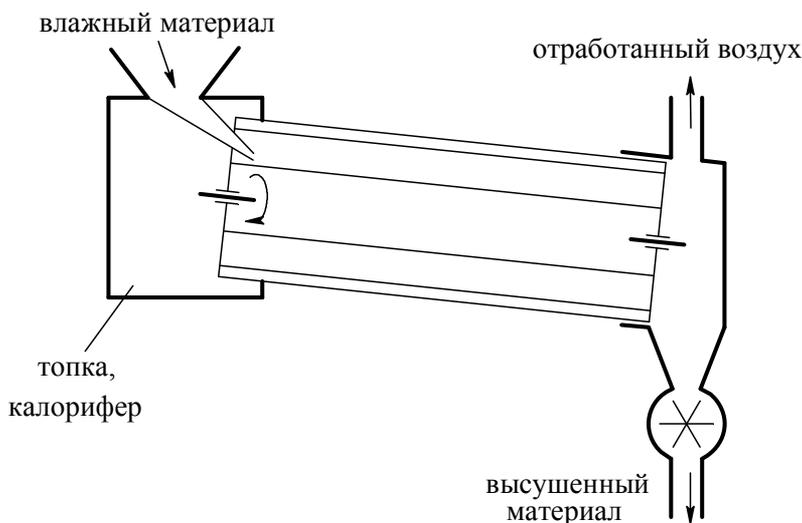


Рис. 8.4. Схема барабанной сушилки

Основной частью барабанных сушилок является наклонный вращающийся цилиндрический или конический барабан с постоянным (чаще всего) или переменным углом наклона. Внутри барабана перемещается, перемешивается и одновременно сушится непрерывно загружаемый материал. Внутренняя часть барабана оборудована лопастями. При вращении барабана они захватывают материал, поднимают его и рассыпают тонкими параллельными каскадами (струйками), занимающими все пространство барабана. Горячие газы, проходя между каскадами падающего материала, непосредственно соприкасаются с

влажными поверхностями его частиц и осуществляют их сушку. Число каскадов, образующихся в сушильном барабане, зависит от его внутреннего устройства.

При конструировании внутренних устройств сушильных барабанов учитывают крупность, плотность и сыпучие свойства подвергаемого сушке материала, а также необходимость обеспечения его равномерного распределения в поперечном сечении барабана.

Различные конструкции внутренних насадок барабанных сушилок в виде поперечного сечения труб-барабанов показаны на рис. 8.5.

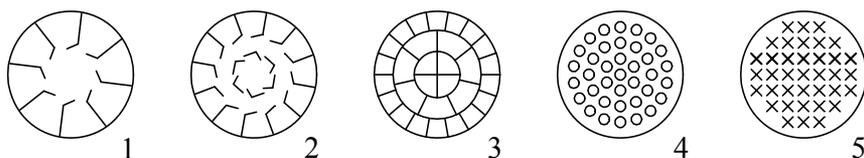


Рис. 8.5. Внутренние насадки барабанных сушилок:

- 1 – подъемно-лопастная; 2 – секторная; 3 – перевалочная с закрытыми ячейками; 4 – с внутренними полыми трубками; 5 – распределительная

Подъемно-лопастная насадка (1) используется для сушки крупнокусковых и склонных к налипанию материалов, а секторная (2) – для малосыпучих и крупнокусковых с высокой плотностью материалов. Для мелкокусковых, сыпучих материалов широко применяются сушилки с внутренними полыми трубками (4).

Для материалов с очень мелкими частицами, дающими большое пыление, применяется перевалочная система с закрытыми ячейками (3). В этом случае при вращении барабана образуются новые поверхности испарения за счет перевалки материала. Для мелкокусковых материалов, обладающих хорошей сыпучестью, внутреннее устройство выполняется в виде отдельных ячеек (5). Оно обеспечивает хорошее пересыпание материала и его равномерное распределение по всему сечению барабана (распределительная система).

В зависимости от внутреннего устройства барабана заполнение его материалом может достигать до 20 % объема. В барабанных сушилках сушка в большинстве случаев производится топочными газами, что позволяет широко использовать их температурный потенциал при смешении с воздухом для конкретных условий сушки. Смесь топочных газов с воздухом и сушимый мате-

риал обычно движутся прямотоком, но в промышленности встречаются и противоточные барабанные сушилки.

Диаметр барабана сушилки  $D_6$  обычно вычисляется с помощью величины напряжения объема барабана сушилки по испаренной влаге  $A$ , определяемой по опытным данным:

$$V_6 = \frac{\pi D_6^2}{4} \cdot L_6 = \frac{W}{A}. \quad (8.1)$$

Длина барабана  $L_6$  принимается в пределах  $(3,5 - 7) D_6$ . Зная количество испаряемой влаги  $W$ , из этого уравнения определяют  $L_6$ . Значения  $A$  для барабанных сушилок достигают  $100 - 120 \text{ кг}/(\text{м}^3/\text{ч})$ . Более точно рабочий объем барабана сушилки может быть найден с помощью объемного коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к материалу  $L_v$  [Дж/м<sup>3</sup> ч град.] по формуле

$$V_6 = 1,2 \frac{Q}{L_v \cdot \Delta t}, \quad (8.2)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка, Дж/ч;

$\Delta t$  – средняя логарифмическая разность температур между материалом и сушильным агентом, °С.

Коэффициент 1,2 учитывает, что материалом занята лишь часть внутреннего объема барабана.

К достоинствам барабанных сушилок следует отнести весьма широкий спектр сушимых материалов с различными свойствами, возможность использования для сушки топочных газов с достаточно высокой температурой ( $t = 700 \dots 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Применение газов с высокой температурой обеспечивает хорошую экономичность сушилки. Значительным преимуществом барабанных сушилок является то, что в них можно сушить материалы, содержащие куски крупностью до 250 мм, а также материалы, не обладающие сыпучими свойствами (флотационные концентраты, шламы, вязкие материалы и др.).

К недостаткам барабанных сушилок можно отнести их металлоемкость, так как они обладают большими габаритами и значительной массой (4 - 5 т на 1 т испаряемой влаги).

### 8.3. Конвективные сушилки со взвешенным слоем материала

#### 8.3.1. Сушилки с кипящим (псевдооживленным) слоем

Эти сушилки – один из наиболее прогрессивных типов сушилок. Процесс в кипящем слое позволяет значительно увеличить поверхность контакта между частицами материала и сушильным агентом, интенсифицировать испарение влаги и сократить (до нескольких минут) продолжительность сушки. Эти сушилки в настоящее время успешно применяются для сушки сильно сыпучих зернистых материалов (каменного и бурого угля, минеральных и органических солей, различных горных пород).

В сушилке с кипящим слоем материал уложен на решетку, продуваемую газом со скоростью, необходимой для создания кипящего слоя. Принципиальная схема сушилки с кипящим слоем показана на рис. 8.6. В этой сушилке для устранения неравномерности сушки применяется направленное движение материала вдоль удерживающей его решетки. С этой целью подача сырого материала производится с одной стороны сушилки, а удаление высушенного материала осуществляется из нижней части с противоположной стороны (например, с помощью шнека).

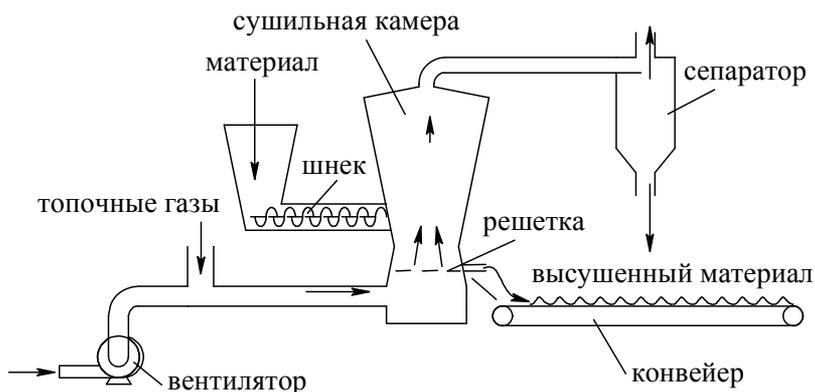


Рис. 8.6. Схема сушилки с кипящим слоем

На схеме показана однокамерная (наиболее распространенная) сушилка непрерывного действия. Сушильным агентом являются либо горячий воздух, либо дымовые газы. Расширяющийся корпус применяется для того, чтобы увеличить равномерность сушки материала. Скорость газа внизу камеры должна превышать скорость осаждения самых крупных частиц, а сверху – быть меньше скорости осаждения самых мелких частиц. При такой форме камеры достигается наиболее равномерная сушка материала, который поднимается и опускается (пульсирует), а весь слой ведет себя как кипящая жид-

кость (почему и называют псевдооживленным). Это позволяет более равномерно высушивать материал.

Имеются многокамерные сушилки с кипящим слоем. Высоту кипящего слоя в сушилках непрерывного действия поддерживают в пределах 400 – 700 мм.

Для сушки небольших количеств материала применяют иногда сушилки кипящего слоя периодического действия.

Значения  $A$  (напряжения объема сушилки по влаге,  $\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ ) для сушилок кипящего слоя непрерывного действия доходят до  $1250 \text{ кг}/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ .

В этих сушилках достигается экономичная сушка с высоким влагосъемом с единицы объема сушильной камеры. Поэтому в прогрессивных технологиях они вытесняют все другие типы. Методика расчета этих сушилок зависит от свойств материала и формы связи воды.

Достоинствами сушки материалов в кипящем слое являются: высокая интенсивность сушки; одинаковая и сравнительно легко регулируемая температура высушиваемого материала в слое; возможность регулирования времени пребывания материала в сушилке.

Недостатками являются большие расходы электроэнергии для создания значительных давлений, необходимых для кипения слоя, а также измельчение частиц некоторых материалов при сушке.

### 8.3.2. Распылительные сушилки

Распылительные сушилки применяются для сушки диспергированных жидких материалов, жидких растворов, суспензий. Основной частью этих сушилок является камера, внутри которой сушка происходит при распылении поступающего в нее жидкого материала (рис. 8.7).

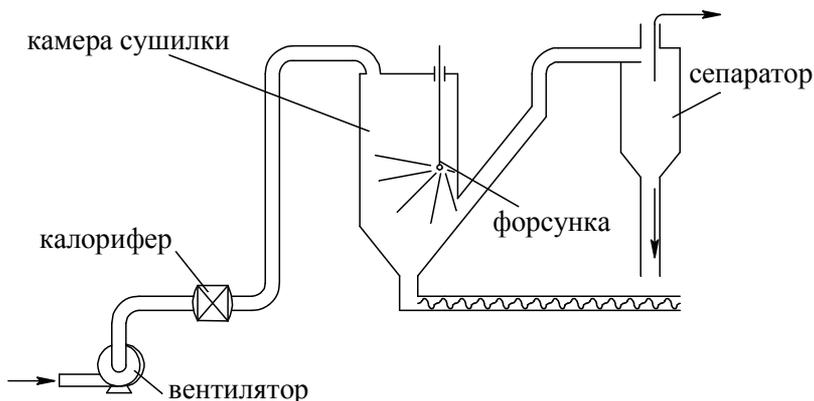


Рис. 8.7. Схема распылительной сушилки

В этих сушилках достигается высокая эффективность испарения влаги за счет тонкого распыления высушиваемого материала в сушильной камере, через которую движется сушильный агент (нагретый воздух или топочные газы). При сушке в распыленном состоянии удельная поверхность испарения достигает столь большой величины, что процесс высушивания завершается чрезвычайно быстро (примерно за 15-30 с). В условиях почти мгновенной сушки температура поверхности частиц материала, несмотря на высокую температуру сушильного агента, лишь не намного превышает температуру испарения чистой жидкости, т.е. материал не пересушивается.

Преимущества использования форсунок состоят в их бесшумной работе и высокой производительности. Недостатками являются непригодность для распыла грубых суспензий или растворов, содержащих твердые частицы или кристаллы; невозможность регулирования производительности, так как при этом меняется дисперсность. Значения напряжения объема сушильного пространства по влаге  $A$  невелики ( $10-14 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$ ).

Конструкции сушилок, в которых распыление происходит при помощи центробежных дисков, пригодны для диспергирования практически любых растворов, суспензий, паст и т.п. Однако они энергоемки, имеют высокую стоимость распыливающего аппарата, сложны в эксплуатации и требуют помещения большой площади.

## **8.4. Конвективные сушилки с пневмотранспортом материала**

### *8.4.1. Пневматические сушилки*

Пневматические сушилки применяются для сушки во взвешенном состоянии зернистых материалов (песок, мел, уголь, торф, калийная и поваренная соль и др.). Сушка осуществляется в вертикальной трубе, которая может иметь различное внутреннее устройство. Такие сушилки зачастую называют трубами-сушилками (рис. 8.8). Для перемещения частиц, находящихся в восходящем газовом потоке, необходимо, чтобы скорость сушильного агента (топочных газов или воздуха) была больше скорости витания частиц. В зависимости от размера и плотности частиц скорость сушильного агента составляет 20-30 м/с. Длина вертикальной трубы – около 20 м.

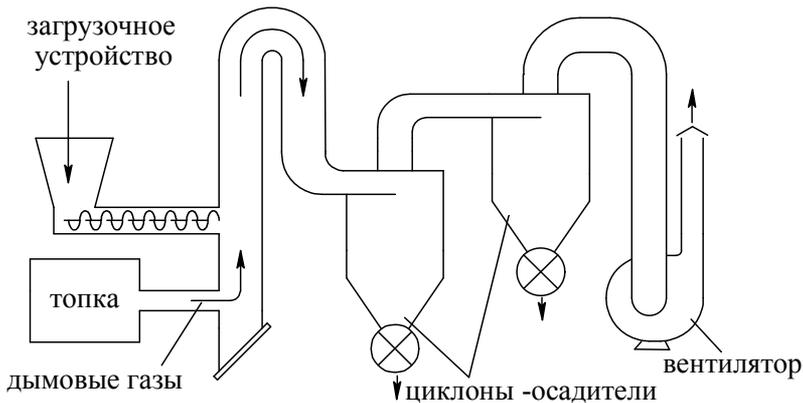


Рис. 8.8. Схема трубы-сушилки

Сушка материалов в трубах-сушилках протекает в условиях конвективного теплообмена и аэродинамического взаимодействия движущихся частиц материала с газовым потоком. Однородное распределение влажного материала в начале сушилки и большая скорость сушки позволяют использовать высокую начальную температуру газов. Показатели удельного влагонапряжения объема труб-сушилок примерно в 10 раз больше, чем в барабанных сушилках.

Преимуществом труб-сушилок являются интенсивный тепло- и массоперенос, высокая скорость сушильного процесса, простая конструкция стационарно устанавливаемой сушилки, низкая металлоемкость, возможность широкой регулировки температуры сушильного агента, сравнительно низкие капитальные затраты.

В трубах-сушилках имеет место высокая интенсивность передачи тепла от газов к взвешенным частицам материала. Сушка материала в горячем газовом потоке происходит практически мгновенно. Материал находится в контакте с горячими газами доли секунды, а во всей системе секунды. Чем меньше размер частиц материала, тем быстрее и глубже протекает процесс сушки. Это приводит к значительной влагоразности между мелкими и крупными частицами, что зачастую влияет на качество конечной продукции, например, изготовленных торфяных брикетов. В целях устранения этого существенного недостатка труб-сушилок предложены схемы с мелющим вентилятором (рис. 8.9), различного рода турбулизаторами (рис. 8.10) и др.

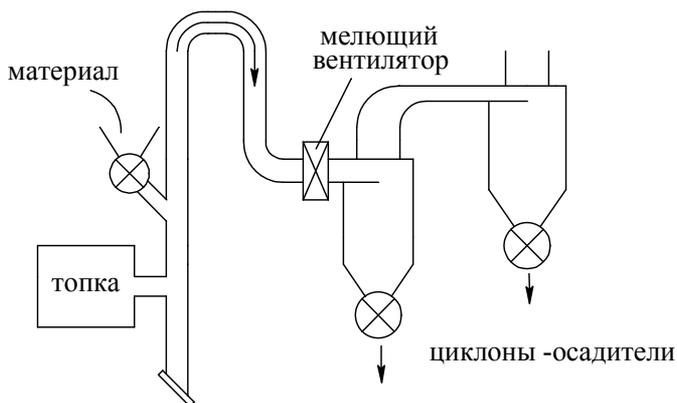


Рис. 8.9. Схема трубы-сушилки с мелющим вентилятором

Установка мелющего вентилятора предназначена для дробления крупных частиц, создания новых поверхностей испарения, интенсификации сушильного процесса и, в конечном итоге, уменьшения влагоразности между крупными и мелкими частицами. Однако эта схема имеет существенные недостатки. Как показала практика, при прохождении потока через вентилятор его лопасти дробят не только крупные частицы, но и более мелкие, что нежелательно. Это приводит к значительным дополнительным энергозатратам. К тому же вся последующая за вентилятором пневмотранспортная система работает под давлением. Это ухудшает санитарно-гигиенические условия труда, а также увеличивает взрывоопасность.

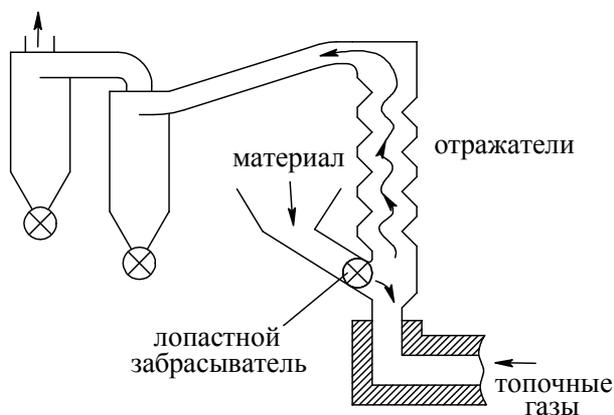


Рис. 8.10. Схема трубы-сушилки с турбулизаторами

Устройство в трубах-сушилках различного рода турбулизаторов в виде отражателей (см. рис. 8.10), цилиндрических и конических расширителей более

целесообразно. Например, при установке в трубе системы отражателей поток меняет скорость и направление своего движения. Он движется зигзагообразно. Возникают центробежные силы, которые сильнее воздействуют на более крупные частицы, искривляют траекторию их движения, заставляют ударяться об отражатели, уменьшают скорость движения. Все это приводит к дроблению более крупных частиц, большему времени нахождения их в потоке и, следовательно, к большему времени сушки. Мелкие частицы мало подвержены действию центробежных сил, поэтому они движутся в основном по центру трубы и находятся в процессе сушки меньше времени. Таким образом уменьшается влагоразность между крупными и мелкими частицами.

Эту же цель преследует установка уширителей на трубе. Помимо дополнительной турбулизации согласно закону неразрывности потока при его встрече с уширением скорость потока уменьшается пропорционально площади поперечного сечения. Крупные частицы замедляют свою скорость и таким образом находятся в процессе сушки более длительное время, что также приводит к выравниванию влагоразности крупных и мелких частиц.

Определенный эффект дает использование в трубах-сушилках лопастных забрасывателей вместо шнеков-дозаторов при загрузке материала в сушилку. Забрасывание материала с большой скоростью навстречу восходящему газовому потоку приводит к сегрегации мелких и крупных частиц: чем крупнее частицы, тем дальше они летят навстречу потоку, а мелкие частицы сразу подхватываются потоком. Дополнительное время нахождения крупных частиц в процессе сушки уменьшает влагоразность между крупными и мелкими частицами.

#### *8.4.2. Шахтно-мельничные сушилки*

Среди пневматических сушилок прогрессивной конструкцией являются шахтно-мельничные сушилки, которые применяются для сушки бурых углей, торфа, глины, известняка, доломита, сульфата. Принципиальная схема шахтно-мельничной сушилки изображены на рис. 8.11.

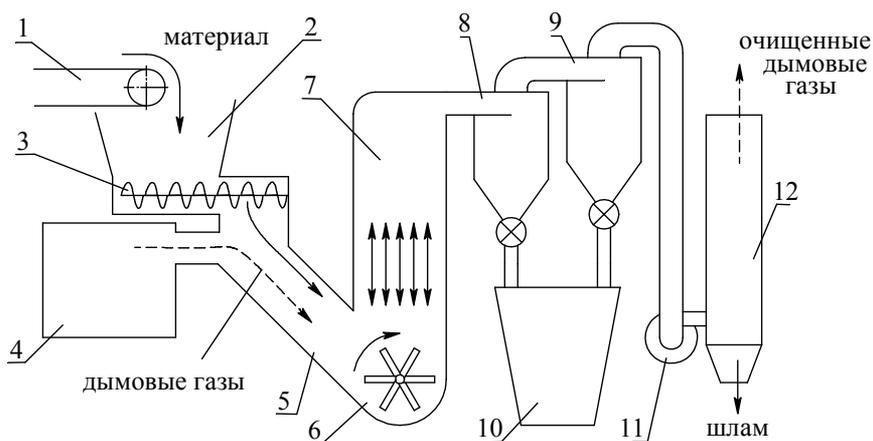


Рис. 8.11. Принципиальная схема шахтно-мельничной сушилки:

- 1 – питающий конвейер; 2 – загрузочный бункер; 3 – шнек-дозатор; 4 – топка;  
 5 – подсушивающий рукав; 6 – шахтная мельница; 7 – сепарационная шахта;  
 8 и 9 – циклоны-осадители; 10 – бункер высушенного материала;  
 11 – вентилятор; 12 – мокрый циклон (скруббер)

Шахтно-мельничная сушилка является универсальным агрегатом, в котором совмещены одновременно несколько операций: сушка, дробление (измельчение) и классификация материала. Благодаря интенсивному перемешиванию дымовых газов с сушимым материалом и непрерывному обнажению новых поверхностей дробимого материала, подводимое тепло максимально используется для испарения влаги.

Наличие подсушивающего рукава позволяет использовать для сушки материала дымовые газы с температурой до 1000 °С. С другой стороны, подача в ротор мельницы частично подсушенного материала улучшает условия ее работы и качество измельчения. Например, при сушке торфа в подсушивающем рукаве испаряется 35-40 %, в шахтной мельнице – 45-50 % от всего количества испаряемой влаги.

Большое значение при работе сушилки имеет шахта: она выполняет роль гравитационного сепаратора. Так как площадь поперечного сечения шахты значительно больше площади поперечного сечения рукава, то соответственно скорость восходящего газового потока будет меньше. Поэтому мелкие легкие частицы будут уноситься газовым потоком сразу, а крупные будут падать обратно в мельницу на повторное дробление до тех пор, пока раздробленные более мелкие частицы не будут подхвачены газовым потоком. При увеличении скорости газов в шахте из сушильной системы будут уноситься более крупные частицы, и наоборот. Таким образом, задавая необходимую скорость газового потока в сепарационной шахте, можно регулировать гранулометрический состав высушенного материала.

Шахтно-мельничная сушилка обеспечивает высокое качество высушенного материала. Так, при работе на торфе в сушенке содержалось частиц размером более 2 мм только 0,5-2 %. Свыше 50 % частиц имели размер менее 0,35 мм. Влагоразность находилась в пределах 2-4 %.

#### 8.4.3. Расчет диаметра и длины трубы-сушилки

Основными расчетными величинами трубы-сушилки являются ее диаметр и длина от места загрузки до пылеосадительной системы.

В зависимости от производительности диаметр может колебаться в широких пределах. Однако из-за трудности распределения материала в трубе он обычно не превышает 1,0-1,1 м.

Диаметр трубы-сушилки определяют по данным теплового расчета сушильного процесса.

Расход сушильных газов согласно (5.13) находят по формуле

$$L = \ell \cdot W ,$$

где  $\ell$  – удельный расход сухих газов, кг/кг влаги;

$W$  – производительность по испаренной влаге, кг/ч.

Зная температуру  $t_1$  и влагосодержание  $d_1$  газов на входе в сушилку, удельный объем смеси ( $\text{м}^3$ ) на 1 кг сухих газов, можно рассчитать по формуле (4.23):

$$v_0 = 4,64 \cdot 10^{-6} (273,15 + t_1) (622 + d_1).$$

Объем влажных газов ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ), поступающих в сушилку,  $V = Lv_0$ . Отсюда диаметр трубы (м)

$$D = \sqrt{\frac{V}{900\pi v_{\text{вх}}}} = \sqrt{\frac{V}{2826v_{\text{вх}}}} = 0,019 \sqrt{\frac{V}{v_{\text{вх}}}} ,$$

где  $v_{\text{вх}}$  – скорость газов на входе в сушилку, м/с.

Скорость газового потока определяется максимальным размером частиц сушеного материала и его плотностью. Обычно она принимается равной 1,3-1,4 скорости витания самых крупных частиц  $v_{\text{вит}}$ .

Скорость витания – это скорость, при которой наступает динамическое равновесие частиц в воздушном потоке. Она является одной из наиболее важных характеристик пневмотранспорта сыпучих материалов.

Для шарообразной частицы

$$v_{\text{ВИТ}} = \frac{3,62}{\sqrt{C}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{М}}}{\rho_{\text{Г}}} d_{\text{Ш}}} \quad (8.3)$$

или

$$v_{\text{ВИТ}} \approx 4,7 \sqrt{d_{\text{Ш}} \rho_{\text{Т}}}, \quad (8.4)$$

где  $C_{\text{Л}}$  – коэффициент лобового сопротивления витающего шара;

$d_{\text{Ш}}$  – диаметр шара, м;

$\rho_{\text{Т}}$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{Г}}$  – то же газа, кг/м<sup>3</sup>.

На горизонтальных трубопроводных участках принимают  $v_{\text{Г}} = 2v_{\text{ВИТ}}$ .

Ориентировочно рабочую длину  $\ell_{\text{Р}}$  трубы-сушилки (м) можно определить с помощью среднего напряжения объема сушильного пространства по влаге по формуле

$$\ell_{\text{Р}} = W / (A F_{\text{ТР}}), \quad (8.5)$$

где  $A$  – среднее напряжение объема сушилки по испаренной влаге, кг/(м<sup>3</sup> ч).

В зависимости от влажности  $w_1$  и  $w_2$   $A \in 200\text{--}400$  кг/м<sup>3</sup>·ч. В среднем принимают при сушке, например, торфа  $A = 250$  кг/ м<sup>3</sup>·ч, а скорость газового потока  $v_{\text{Г}} = 25 \dots 30$  м/с.

### 8.5. Контактные сушилки

Контактная сушка материалов осуществляется за счет тепла, получаемого при соприкосновении с нагретой плоской или цилиндрической поверхностью. Часто нагрев поверхности производится водяным паром, а в некоторых случаях – горячей водой или высококипящими органическими веществами. На выбор теплоносителя существенно влияет допустимая для материала температура. Паровой обогрев применяют обычно для материалов, выдерживающих в сухом состоянии температуру 100–110 °С.

Конструктивно контактные сушилки выполняются в виде сушильных шкафов с расположенными по их высоте обогреваемыми полками, плитами и т.п., на которых располагается периодически загружаемый высушиваемый материал, или в виде непрерывно действующих вальцовых или цилиндрических сушилок. Контактные сушилки работают при атмосферном давлении или в вакууме.

### 8.5.1. Вакуум-сушильные шкафы

Простейшими контактными сушилками являются вакуум-сушильные шкафы, используемые для периодической сушки малотоннажных продуктов в производствах с разнообразным ассортиментом продукции, где применение других сушилок экономически не оправдано. Сушильные шкафы представляют собой вакуумную камеру, внутри которой установлены полые трубы для греющего пара. Материал находится на полках в противнях. Вакуум создается вакуум-насосами. Загрузка-выгрузка осуществляется вручную или с помощью средств малой механизации. Напряжение рабочей поверхности сушилки  $A = 0,5 \dots 3,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ .

### 8.5.2. Вальцовые сушилки

Вальцовыми являются сушилки непрерывного действия, предназначенные для сушки пастообразных и жидких веществ (растворов, коллоидов и суспензий) различной плотности, концентрации и вязкости. В качестве рабочей части они имеют один или два полых вращающихся вальца, обогреваемые изнутри паром, горячей водой или маслом. На поверхности этих вальцов в течение одного оборота происходит высушивание нанесенного тонким слоем пастообразного или жидкого материала.

Для сушки пастообразных материалов распространение получили одновальцовые формующие сушилки, работающие при атмосферном давлении (рис. 8.12).

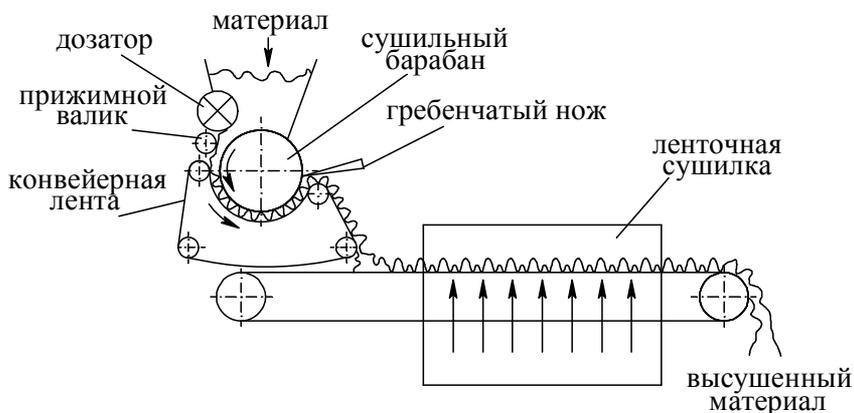


Рис. 8.12. Схема одновальцовой формующей сушилки

Барабан имеет рифленую поверхность с кольцевыми канавками глубиной 6–10 мм. Паста из загрузочной воронки вмазывается в канавки с помощью при-

жимного валика. За один оборот вальца в его канавках образуются отформованные палочки пористой структуры, которые легко выламываются небольшими кусочками посредством гребенчатого ножа. Досушка производится в ленточной сушилке.

## **8.6. Специальные виды сушки и типы сушилок**

### *8.6.1. Терморadiационные сушилки*

Терморadiационные сушилки получают свое тепло от инфракрасных лучей. В этом случае к материалу можно подводить удельные потоки тепла, в десятки раз превышающие соответствующие потоки при конвективной и контактной сушке. Поэтому при сушке инфракрасными лучами растет интенсивность испарения влаги из материала. Однако по технологическим условиям не всегда возможно увеличить скорость сушки материала пропорционально увеличению теплового потока. Во многих случаях скорость подвода тепла к материалу ограничивается скоростью перемещения влаги внутри материала и требуемым качеством сушки (например, отсутствие остаточных деформаций после сушки).

Терморadiационные сушилки компактны и эффективны для сушки тонколистковых материалов, деревянных изделий, покрытий, но отличаются высоким расходом энергии: 1,5-32,5 кВт·ч на 1 кг испаренной влаги, что ограничивает их применение.

### *8.6.2. Сушка в электрическом поле высокой частоты*

Высокочастотные сушилки наиболее рационально применять для высушивания толстослойных материалов, когда необходимо регулировать температуру и влажность не только на поверхности, но и, главное, в глубине материала. Токами высокой частоты можно сушить древесину, пластические массы и другие материалы, обладающие диэлектрическими свойствами.

В этих сушилках можно регулировать величину температурного градиента в материале, скорость сушки, избирательно нагревать ту или другую часть крупных материалов и изделий.

Сушка токами высокой частоты требует больших затрат энергии (2,5-5,0 кВт·ч/ кг влаги). К недостаткам сушки токами высокой частоты следует также отнести довольно сложное оборудование и обслуживание.

### *8.6.3. Сублимационные сушилки*

Широкое распространение в пищевой промышленности в последние годы получил способ сушки материалов в замороженном состоянии при низкой

температуре в условиях вакуума. Этот способ сушки, называемый сублимацией (иногда его называют молекулярной сушкой), позволяет сохранить основные биологические качества сушеного материала на длительное время, что очень важно для пищевых продуктов. Сублимацией называется процесс испарения твердого тела без его плавления, т.е. минуя жидкую фазу. Применительно к процессу сушки сублимация влажного материала – процесс его сушки в замороженном состоянии (сублимация льда, находящегося внутри материала).

Процесс удаления влаги происходит в три стадии. На первой стадии происходит самозамораживание, когда в результате снижения давления в сушильной камере происходит замораживание влаги в материале. При этом резкое снижение давления приводит к интенсивному испарению влаги с поверхности материала. При самозамораживании обычно испаряется 10-15 % всей удаляемой влаги. На второй стадии происходит сублимация льда за счет тепла, отдаваемого материалом. На этой стадии удаляется основная часть влаги (65-70 %). Третья стадия характеризуется удалением остаточной влаги.

Достоинством сублимационной сушки материалов является сохранение основных биологических качеств сушеного материала, а также незначительный расход (2100-2300 кДж/кг влаги) низкопотенциального тепла при температуре 40-50 °С.

Недостатками являются относительно высокая стоимость сушки, сложность и громоздкость оборудования.

## **9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

### **9.1. Аппараты газоочистки**

В состав сушильных установок входят, наряду с собственно сушилками, пылеосадительные аппараты, вентиляторы, дымососы и предохранительные (противопожарные, противовзрывные) устройства.

Применение аппаратов газоочистки обусловливается необходимостью максимального улавливания из газового потока высушенного материала. Эффективность пылеулавливания во многом определяет экономичность всего процесса сушки.

Очистка воздуха обычно производится в специальных аппаратах, называемых пылеуловителями или пылеотделителями. Их работа должна обеспечивать санитарные нормы предельно допустимой запыленности помещений  $6 \text{ мг/м}^3$ , а содержание пыли в выбросах не должно превышать  $100 \text{ мг/м}^3$ .

Степень очистки запыленных газов зависит от совершенства конструкции пылеуловителя, физико-механических свойств осаждаемых частиц и газа. Ве-

личина уноса обычно определяется на основании экспериментальных данных. При этом различают степень очистки (Кпд аппарата).

Степенью очистки газового потока от взвешенных в нем частиц называется отношение массы уловленного  $G_{ул}$  к массе поступившего в аппарат  $G_{вх}$  материала, выраженное в долях единицы или процентах:

$$\eta = \frac{G_{ул}}{G_{вх}} \quad (9.1)$$

$$\text{или } \eta = \frac{G_{ул}}{G_{вх}} \cdot 100\% = \frac{(G_{вх} - G_{ун})}{G_{вх}} \cdot 100\%, \quad (9.2)$$

где  $G_{ун}$  – масса уноса.

Для улучшения очистки часто используется последовательная установка нескольких осадительных аппаратов. В этом случае определяется суммарная степень очистки в долях единицы:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_n), \quad (9.3)$$

где  $\eta_1, \dots, \eta_n$  – степень очистки отдельных последовательно установленных аппаратов, доли ед.

Степень очистки может иметь различную величину. Например, в электрофильтрах очистка достигает 99 и даже 99,9 %.

Применение многоступенчатой газоочистки увеличивает общий КПД системы, однако это связано с повышением ее гидравлического сопротивления и соответственно расхода электроэнергии.

Гидравлическое сопротивление пылеуловителя

$$\Delta P = P_{вх} - P_{вых}, \quad (9.4)$$

т.е. разности полных давлений газа (Па) на входе  $P_{вх}$  и на выходе  $P_{вых}$ . Полное давление

$$P = P_{ст} + P_{дин}. \quad (9.5)$$

Статическое давление ( $P_{ст}$ ) представляет собой разность между давлением газа в осадителе и окружающей среде. Динамическое давление ( $P_{дин}$ ) определяется скоростью газового потока ( $v_{г}$ , м/с):

$$P_{дин} = \frac{\rho_{г} v_{г}^2}{2}, \quad (9.6)$$

где  $\rho_r$  – плотность газа при рабочей температуре, кг/м<sup>3</sup>.

В расчетах гидравлическое сопротивление определяют по формуле

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (9.7)$$

где  $\xi = \frac{\Delta P}{P_{\text{дин}}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления (зависит от конструкции, дается в нормалях пылеуловителей).

Пылеуловители делятся на группы: *сухие механические* (циклоны), в которых взвешенные частицы отделяются от газа под действием центробежных сил;

*мокрые пылеуловители*, основанные на осаждении частиц путем промывки запыленного газа жидкостью, смачивающей и увлекающей взвешенные частицы;

*фильтры в виде пористых перегородок* или волокнистого материала, задерживающих пыль;

*электрофильтры*, работа которых основана на отделении взвешенных частиц от газа под действием электрических сил.

Часто применяют комбинированные фильтры. Аппараты сухой газоочистки имеют различное конструктивное решение, основанное на использовании силы тяжести и сил инерции.

## 9.2. Циклоны

*Циклоны* – это самые распространенные, простые и дешевые аппараты газоочистки. На рис. 9.1 показана схема циклона.

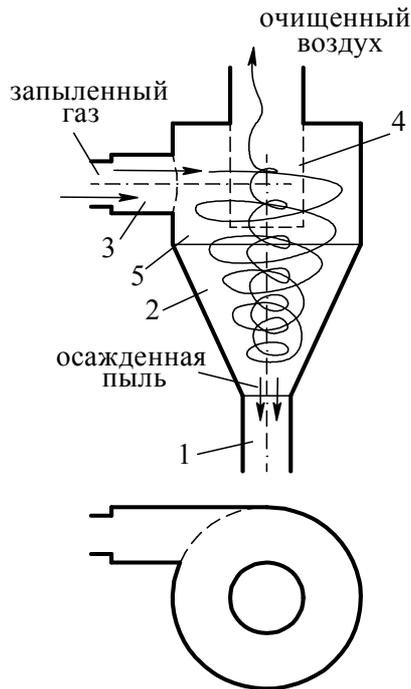


Рис. 9.1. Схема циклона:

1 – пылеотводящий патрубок; 2 – коническая часть корпуса; 3 – входной патрубок; 4 – выхлопная труба; 5 – цилиндрическая часть корпуса

Для правильной работы циклон снабжается пылесобирающим бункером и затворами для выгрузки пыли. Поток на входе в циклон получает вращательное движение в цилиндрической части. За счет центробежных сил происходит отделение пыли от газового потока. Пыль осаждается вниз, а газ выходит вверх.

На степень очистки запыленных газов в циклонах влияет ряд факторов: дисперсный состав пыли, плотность частиц, концентрация пыли в газовом потоке, скорость его движения во входном патрубке, размеры и конструктивные особенности циклонных аппаратов.

Дисперсный состав пыли и плотность ее частиц в значительной мере влияют на эффективность пылеулавливания. Чем крупнее и тяжелее частицы, тем легче их уловить.

Степень очистки зависит также от концентрации пыли в воздухе. Ее увеличение до некоторого предела повышает эффективность очистки. Большое влияние оказывает скорость газового потока во входном патрубке циклона, оптимальное значение которого принимается в пределах 10-22 м/с. При увеличении скорости выше оптимального значения эффективность пылеулавливания растет незначительно, но значительно увеличивается гидравлическое со-

противление циклонов (пропорционально квадрату скорости). Снижение скорости (ниже 10 м/с) уменьшает эффективность очистки, приводит к отложению пыли, повышению взрывоопасности установки в целом.

Сухая очистка, как правило, осуществляется в две ступени. В первой ступени осажается основная масса материала (обычно это циклоны ВТИ, ЛИОТ), а во второй ступени – более тонкой – циклоны НИИОГАЗ. Для тонкой очистки иногда применяют циклоны СИОТ. Следует заметить, что несмотря на многообразие циклонов, можно, как показали испытания, ограничиться одним типом циклонов – НИИОГАЗ. Циклоны НИИОГАЗ бывают *конические* и *цилиндрические*. Конические циклоны отличаются от цилиндрических большим сопротивлением, но и большей эффективностью.

К цилиндрическим циклонам (рис. 9.2) относятся ЦН-11, ЦН-15, ЦН-24. Их отличительная особенность – наличие удлиненной цилиндрической части, наклонное расположение крышки и входного патрубка. Угол наклона для различных типов циклонов принимается равным 11, 15 и 24°.

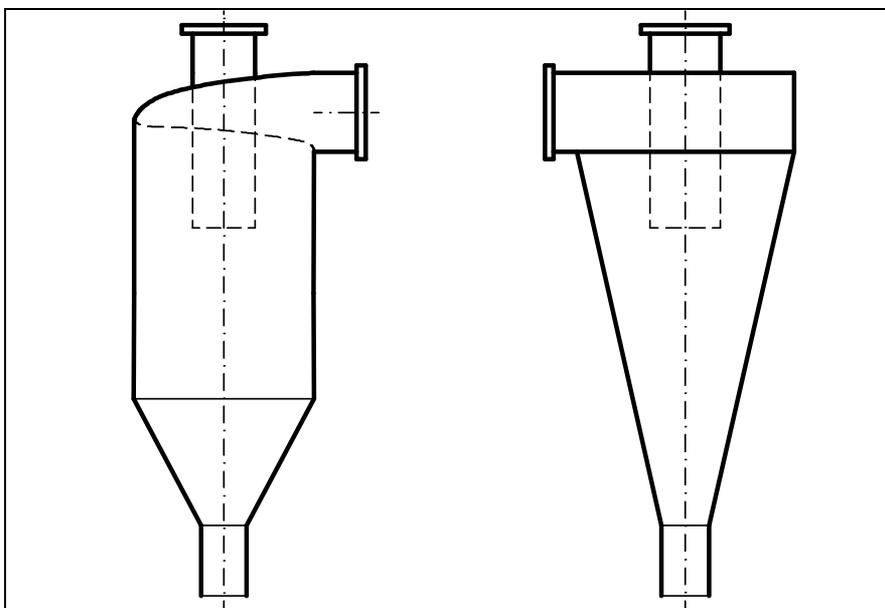


Рис. 9.2. Схема цилиндрического циклона:  
1 – спиральный входной патрубок;  
2 – цилиндрический корпус; 3 – выхлопная труба; 4 – пылеотводящий патрубок

Рис. 9.3. Схема конического циклона:  
1 – спиральный входной патрубок;  
2 – конический корпус; 3 – выхлопная труба; 4 – пылеотводящий патрубок

К коническим циклонам НИИОГАЗ (рис. 9.3) относятся аппараты СК-ЦН-33, СЦН-40. Для конических циклонов характерны длинная коническая часть, спиральный входной патрубок и малое отношение диаметра к корпусу цикло-

на (0,3 – 0,4). Согласно ГОСТам диаметры циклонов нормированы: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 мм. Циклоны НИИОГАЗ выпускаются как в единичном, так и в групповом исполнении (2, 4, 6, 8, 10, 14). Отвод газов из циклона также выполнен по-разному. В одиночных циклонах газ отводится через улитку, соединительный патрубок или через выхлопную трубу. При групповой компоновке циклонов очищенный газ отводится через общий сборник или улитку.

Циклоны изготавливаются из стали  $\delta = 3 \dots 5$  мм. При наличии агрессивной среды толщина стенок увеличивается; температура газов, поступающих на очистку, допускается до  $400^\circ\text{C}$ ; запыленность газов  $20\text{-}2500$  г/м<sup>3</sup>; нижний предел температуры газов должен превышать на  $20^\circ\text{C}$  температуру точки росы.

Скорость газов на первой ступени циклона ЦН-15 должна составлять  $2.4\text{-}2.5$  м/с, на второй –  $3,0\text{-}3,5$  м/с ( $1,4\text{-}1,7$  м/с в СЦН-40).

Размер циклона выбирают по диаметру для данного объема газов, подлежащих очистке. При одиночном исполнении диаметр циклона (м) может быть определен по формуле

$$D = 0,95 \cdot \sqrt[4]{V_{\text{ц}}^2 \cdot \rho \xi / \Delta P}, \quad (9.8)$$

где  $V_{\text{ц}}$  – расход газов, проходящих через циклон, м<sup>3</sup>/с;

$\rho$  – плотность очищаемых газов при рабочей температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta P$  – гидравлическое сопротивление, Па;

$\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

По опытным данным, оптимальные значения  $\frac{\Delta P}{\rho}$  для цилиндрических циклонов ЦН-11 составляют  $800\text{-}1400$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, для ЦН-15 –  $500\text{-}1000$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, для ЦН-24 –  $300\text{-}600$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>, для конических циклонов –  $1200\text{-}2000$  м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

При групповой установке циклонов их число определяют по производительности одного из них. В этом случае, задавшись размером циклона, находят объем газов (м<sup>3</sup>), проходящих через циклон в 1 с:

$$V_{\text{ц}} = 1,1 \cdot D^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho \cdot \xi}}. \quad (9.9)$$

Затем определяют число циклонов в группе:

$$D = \frac{V}{V_{\text{ц}}}. \quad (9.10)$$

По известным  $V_{ц}$ ,  $\rho$ ,  $D$  и  $\xi$  вычисляют гидравлическое сопротивление (Па):

$$\Delta P = 0,81 \xi \rho V_{ц} / D^4. \quad (9.11)$$

### 9.3. Мокрые пылеуловители

Мокрые пылеуловители применяются в качестве второй или третьей ступени очистки газов. С помощью мокрой очистки можно повысить степень очистки пыли. Мокрая очистка запыленных газов достигается промывкой водой или другой жидкостью. С этой целью запыленный газ приводится в тесный контакт с жидкостью, которая разбрызгивается или превращается в пену. Под действием инерционных сил взвешенные частицы осаждаются в жидкости. При этом газы охлаждаются, как правило, до температуры ниже точки росы. Конденсация паров жидкости способствует осаждению мельчайших частиц твердого материала.

Существуют различные типы мокрых пылеуловителей, но наибольшее распространение для мокрой очистки получили скрубберы – статические аппараты для промывки газов путем разбрызгивания жидкости в газовом пространстве. По устройству они напоминают циклоны, внутренние стенки которых орошаются жидкостью. Газы подводятся в нижнюю часть и удаляются из верхней (рис. 9.4).

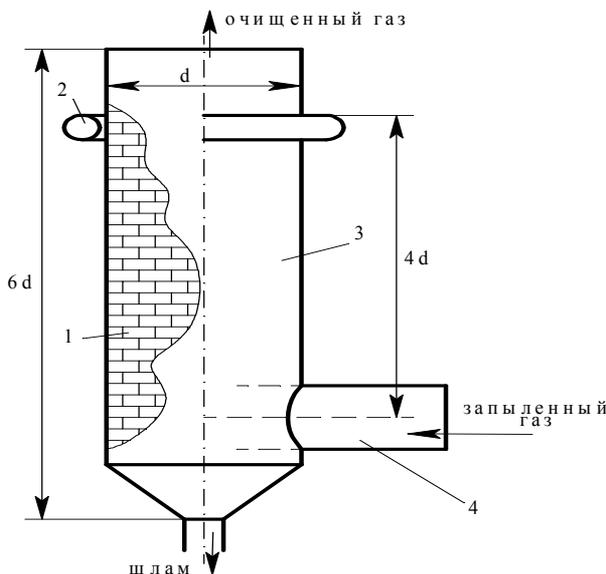


Рис. 9.4. Схема центробежного скруббера:  
 1 – футеровка; 2 – водоподводящий патрубок; 3 – корпус скруббера;  
 4 – тангенциальный вход запыленного газа

Максимальную скорость газового потока на входе в скруббер рекомендуется принимать равной не более 23 м/с, а в поперечном сечении корпуса – до 5 м/с. Гидравлическое сопротивление скруббера 480-500 Па, расход воды 0,7-3,25 м<sup>3</sup>/ч. Для равномерного орошения скруббера давление воды должно составлять от 15 до 25 кПа. Корпус изготавливается из стали толщиной  $\delta = 5$  мм, внутри футеруется кислотоупорной плиткой.

Диаметр скрубберов находится в пределах от 600 до 1700 мм с правым и левым вращением газов. С увеличением диаметра  $d$  эффективность скруббера снижается. Высота обычно составляет от 4 до 9 м, гидравлическое сопротивление равно 650-800 Па, максимальная подача по влажным газам – 1,1-11,2 м<sup>3</sup>/с.

#### **9.4. Электрофильтры**

Осаждение пыли в электрофильтрах является наиболее совершенным способом очистки газов от пыли. Они имеют наиболее высокий КПД, малое гидравлическое сопротивление и незначительный расход электроэнергии. Стоимость электрофильтров намного выше других пылеосадительных аппаратов.

Сущность электрической очистки состоит в следующем. Газ, содержащий взвешенные частицы, проходит через систему, состоящую из заземленных осадительных электродов и размещенных на некотором расстоянии от них коронирующих электродов, к которым подводится выпрямленный электрический ток высокого напряжения. У поверхности коронирующего электрода происходит ионизация воздуха, газа, сопровождающаяся возникновением коронного разряда (корона). Улавливаемые частицы вследствие их адсорбции на поверхности ионов газа приобретают электрический заряд и затем движутся к электродам, осаждаясь на них. Основное количество пыли осаждается на развитой поверхности осадительных электродов. По мере накопления частиц фильтры встряхиваются либо промываются.

Основным условием высокоэффективной работы электрофильтров является поддержание высокого напряжения на электродах. В качестве осадительных электродов используются трубы или пластины, коронирующие электроды – проволока различного сечения. Переменный ток напряжением 380/220 В преобразуется в постоянный напряжением 35-80 кВ.

#### **9.5. Вентиляторы сушильных установок**

Вентиляторы – это тягово-дутьевые машины, служащие для подачи, транспортирования, перемещения газового потока. Это неотъемлемая часть любой сушильной установки (транспортирование сушильного агента, материала, обеспыливание помещений и т.д.). В зависимости от направления потока газа в рабочем колесе вентиляторы делятся на центробежные и осевые. В центро-

бежных вентиляторах (рис. 9.5) всасываемый по оси поток под действием центробежных сил, развиваемых рабочим колесом с лопатками, нагнетается в спиральный корпус, изменяя при этом направление движения на  $90^\circ$  с осевого на радиальное, поэтому допускается наименование центробежных вентиляторов также радиальными.

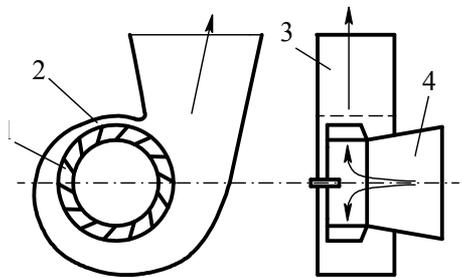


Рис. 9.5. Схема центробежного вентилятора:  
 1 – рабочее колесо (ротор); 2 – спиральный корпус; 3 – выходной патрубок;  
 4 – входной патрубок

В осевых вентиляторах (рис. 9.6) газ засасывается и нагнетается вдоль оси рабочего колеса, не изменяя направления движения.

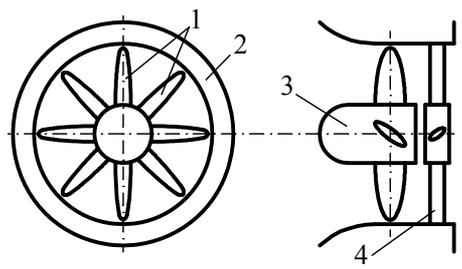


Рис. 9.6. Схема осевого вентилятора:  
 1 – рабочее колесо; 2 – цилиндрический кожух; 3 – обтекатель;  
 4 – спрямляющий аппарат

Осевые вентиляторы рекомендуется использовать для перемещения больших объемов газа (воздуха). Они компактны, просты, дешевы, легко регулируются. Используются для проветривания помещений, вентиляции шахт, туннелей, отвода сушильного агента в камерных и туннельных сушилках.

В барабанных, паровых, пневмогазовых сушилках применяются лишь центробежные вентиляторы, так как они преодолевают большое сопротивление и осуществляют перемещение измельченного материала.

Центробежный вентилятор состоит из трех основных элементов: рабочего колеса (ротора), станины с валом, спирального кожуха.

По развиваемому давлению центробежные вентиляторы делятся на три группы:

- низкого давления – до 1000 Па;
- среднего давления – от 1000 до 3000 Па;
- высокого давления – от 3000 до 1200 Па.

Центробежные вентиляторы, предназначенные для перемещения топочных газов, называются *дымососами*, а для перемещения засоренного механическими примесями воздуха – *пылевыми вентиляторами*. Для пневмотранспорта угольной, торфяной и другой пыли применяются мельничные вентиляторы, работающие совместно с измельчающими машинами.

Их корпуса изготавливаются из износостойких металлов. Корпуса таких вентиляторов имеют утолщенные стенки и могут наплавляться твердыми сплавами.

Рабочее колесо имеет большое число лопаток. Отношение ширины лопатки к ее длине определяет развиваемое давление. Для вентиляторов высокого давления это отношение наименьшее. У некоторых типов центробежных вентиляторов высокого давления лопатки загнуты назад для создания большего напора. Число лопаток у вентилятора высокого и среднего давления колеблется от 10 до 24.

Применение лопаток с загнутыми назад лопатками приводит также к уменьшению шума.

Вентиляторы с радиальными лопатками применяются для транспортирования сыпучих материалов. Их недостаток заключается в увеличенном расходе электроэнергии и повышенном шуме.

## **9.6. Характеристики насосов и вентиляторов.**

### **Рабочая точка**

Качественная оценка работы насосов и вентиляторов производится по их характеристикам, построенным в виде графических зависимостей.

Графические зависимости напора  $H$ , потребной мощности  $N$  и КПД насоса  $\eta$  от его производительности (подачи)  $V$  при постоянном числе оборотов  $n$  называют *характеристиками насоса*. Эти характеристики получают в результате испытаний (рис. 9.7).

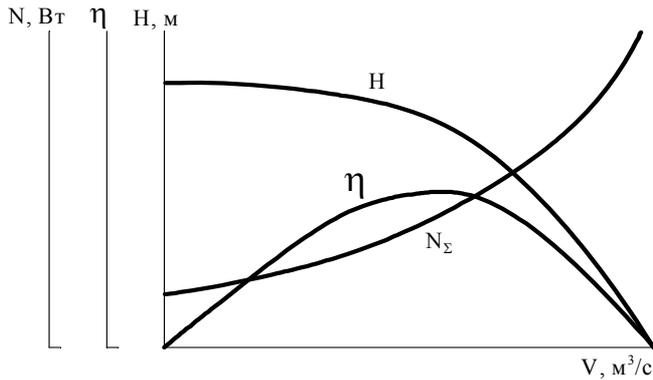


Рис. 9.7. Характеристики насоса (вентилятора)

Характеристики центробежных вентиляторов подобны, как и других центробежных машин для перемещения и сжатия газов, характеристикам центробежных насосов.

Как видим, с увеличением производительности (подачи)  $V$  насоса (вентилятора) напор  $H$  уменьшается, потребляемая мощность  $N_e$  растет, КПД  $\eta$  проходит через максимум. Обычно снимают характеристики  $H(V)$  при различной частоте вращения рабочего колеса  $n$ .

При выборе насоса необходимо учитывать характеристику сети (трубопровода и аппаратов, через которые перемещаются жидкости, газы). Характеристика сети выражает зависимость между расходом жидкости, газа и напором  $H$ , необходимым для перемещения газа, жидкости по данной сети. Этот напор равен сумме геометрической высоты подачи  $H_T$  и потерь напора  $h_{\Pi}$ . Совмещение характеристик сети и насоса показано на рис. 9.8.

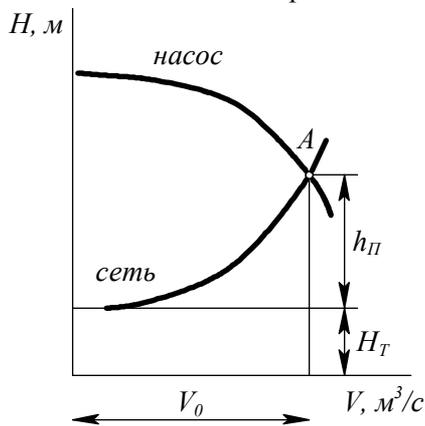


Рис. 9.8. Совмещение характеристик сети и насоса:  
 $H_T$  – геометрическая высота подачи;  $h_{\Pi}$  – потери напора;  
 $V_0$  – искомая производительность насоса при его работе на сеть

Точка  $A$  называется *рабочей точкой* и отвечает наибольшей производительности насоса  $V$  при его работе на сеть. Если требуется более высокая производительность, то следует увеличить число оборотов насоса (вентилятора).

Насос (вентилятор) должен быть выбран так, чтобы рабочая точка соответствовала требуемым производительности и напору.

Для дымососов и дутьевых вентиляторов аэродинамические характеристики строятся на параметрах перемещаемых ими газов.

Исходными данными для выбора вентилятора служат производительность по влажному газу и общее сопротивление сети (системы). При работе на чистом воздухе производительность вентилятора принимается равной расчетной. Для производственных условий (с учетом неплотностей сети, подсосов и т.д.) следует увеличивать производительность (подачу) вентилятора и развиваемое давление на 10 %. Аэродинамические характеристики в каталогах даются обычно для атмосферного воздуха плотностью  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ . Пересчет давления для других характеристик воздуха  $P$  проводится по формуле

$$P_V = \frac{P_0 \cdot \rho_0}{\rho_V}, \quad (9.12)$$

где  $\rho_V$  – плотность воздуха при других параметрах,  $\text{кг/м}^3$ .

При изменении частоты вращения  $n$  вентилятора новые значения параметров рассчитываются по формулам

$$V_2 = V_1 \frac{n_2}{n_1}, \quad P_2 = P_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad N_2 = N_1 \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^3. \quad (9.13)$$

Мощность на валу вентилятора  $N$  находят по уравнению

$$N = \frac{V \cdot H \cdot \rho \cdot g}{\eta} = \frac{V \cdot P}{\eta}, \quad (9.14)$$

где  $V$  – производительность вентилятора,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напор вентилятора, м;

$\rho$  – плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\eta$  – КПД вентилятора;

$P$  – давление, развиваемое вентилятором, Па.

Напор вентилятора  $H$  рассчитывают с помощью рабочей точки.

## 10. РАСЧЕТ СУШИЛОК

### 10.1. Расчет барабанной паровой трубчатой сушилки

#### 10.1.1. Конструкция и принцип действия

Сушилка (рис. 10.1) представляет собой вращающийся на цапфах и наклонный к горизонту сварной барабан 1. Внутри барабана находится труба-вал 2, а в торцовых частях его расположены трубные решетки 3, куда ввальцованы параллельно оси барабана цилиндрические трубки 4. Цапфы лежат в подшипниках 5, корпуса которых имеют шаровую поверхность, что дает возможность менять угол установки барабана.

Вращение барабана осуществляется приводом 6, включающим электродвигатель постоянного тока, зубчатый венец, малую цилиндрическую шестерню и редуктор. Скорость вращения барабана может регулироваться в пределах 6 – 12 мин<sup>-1</sup> в зависимости от влажности и плотности сушимого материала.

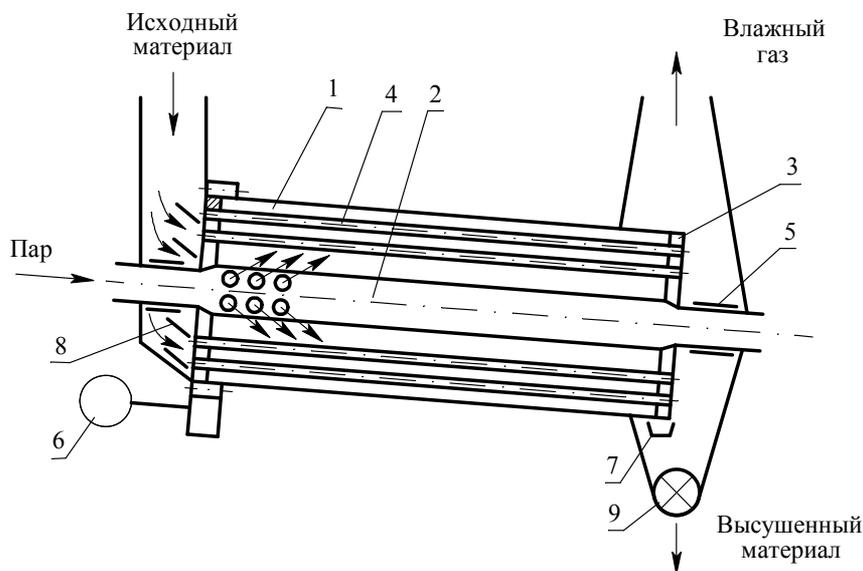


Рис. 10.1. Барабанная паровая трубчатая сушилка

Пар под давлением 0,15 – 0,3 МПа и при температуре 110-130 °С через полную цапфу и шесть отверстий, находящихся в передней части вала-трубы, поступает в полость сушильного барабана, нагревает цилиндрические трубки, которые в свою очередь передают свое тепло для сушки материала, находяще-

гося внутри цилиндрических трубок. Отвод сконденсированной воды 7 производится через заднюю цапфу при помощи изогнутых трубок.

Загрузка сушилки материалом осуществляется непрерывно через загрузочный рукав при помощи полок 8, которые расположены под углом  $38^\circ$  к трубной решетке. С полок материал поступает в трубки вращающейся сушилки. Материал при вращении барабана скользит по нагретой внутренней поверхности трубок, непрерывно пересыпается и продвигается к заднему концу барабана. Продолжительность пребывания материала в сушилке зависит от частоты вращения и угла наклона барабана.

Разгрузочное устройство имеет камеру выгрузки с шлюзовым барабанным затвором в нижней части 9.

Воздух – сушильный агент – поступает в сушилку непосредственно из цеха и, принудительно проходя вместе с материалом по трубкам, отводит испаряемую влагу, частично захватывая пылевидные частицы.

### 10.1.2. Пример расчета

Рассчитать сушильный цех торфобрикетного завода, оборудованный паровыми трубчатыми сушилками, при следующих условиях: годовая производительность по брикетам  $Q_{\text{год}} = 120000$  т; влажность исходного торфа  $w_1 = 50\%$ ; влажность высушенного торфа  $w_2 = 16\%$ . Параметры сушильного агента при входе в сушилку  $t_0 = 30^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0 = 50\%$ , то же при выходе из сушилки  $t_2 = 80^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_2 = 60\%$ . Температура входящего в сушилку торфа  $\vartheta_1 = 15^\circ\text{C}$ , а выходящего  $\vartheta_2 = 80^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Торфобрикетный завод работает в круглосуточном режиме. С учетом коэффициента использования рабочего времени ежегодный баланс рабочего времени завода составляет от 7000 до 7200 ч. Принимаем  $R = 7200$  ч.

Производительность завода за 1 ч рабочего времени  $Q = Q_{\text{год}}/R = 120000/7200 = 16,667$  т/ч.

Количество материала, выходящего из сушильного цеха  $G_2$  с учетом потерь  $\xi_2 = 3\%$ :

$$G_2 = \frac{Q}{(100 - \xi)/100} = \frac{16,667}{(100 - 3)/100} = 17,182, \text{ т/ч.}$$

Количество материала, входящего в сушильный цех с учетом потерь  $\xi = 2\%$ :

$$G_1 = G_2 = \frac{G_2(100 - w_2)}{(100 - w_1) \cdot 0,98} = \frac{17,182(100 - 16)}{(100 - 50) \cdot 0,98} = 28,866 \text{ т/ч.}$$

Количество влаги  $W_{\text{цех}}$ , испаряемой в сушильном цехе за 1 ч:

$$W_{\text{цех}} = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = 28,866 \frac{50 - 16}{100 - 16} = 11,684 \text{ т/ч.}$$

В торфобрикетной промышленности в настоящее время применяются паровые трубчатые сушилки трех типоразмеров, характеристики которых приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Типоразмеры сушилок

Типоразмеры сушилок	Типы сушилок		
	III	VI	VII
Диаметр сушильного барабана, мм	3150	3750	4000
Длина барабана, мм	8000	8000	8000
Число трубок, шт.	468	720	876
Поверхность нагрева, м <sup>2</sup>	1180	1820	2220

Выбираем тип сушилки VII.

Поверхность нагрева одной сушилки

$$F = \pi d \cdot L \cdot n, \text{ м}^2,$$

где  $d$  – диаметр цилиндрических трубок,  $d = 0,1$  м;

$L$  – длина барабана,  $L = 8$  м;

$n$  – количество цилиндрических трубок;  $n = 876$  шт.;

$$F = 3,14 \cdot 0,1 \cdot 8 \cdot 876 = 2220 \text{ м}^2.$$

Производительность одной сушилки по испаренной влаге

$$W_{\text{суш}} = A \cdot F, \text{ кг вл/ч,}$$

где  $A$  – напряжение поверхности нагрева по влаге, показывающее количество влаги, испаряемое 1 м<sup>2</sup> поверхности нагрева за 1 ч, кг вл/(ч·м<sup>2</sup>). Оно зависит от температуры и давления греющего пара и находится в интервале  $A = 1,5 - 3$  кг вл./(ч·м<sup>2</sup>).

Принимаем  $A = 2,7$  кг вл./(ч·м<sup>2</sup>).

$$W_{\text{суш}} = 2,7 \cdot 2220 = 5994 \text{ кг вл./ч.}$$

Число сушилок, потребное для испарения влаги

$$W_{\text{цех}}/W_{\text{суш}} = 11,684/5994 = 1,95.$$

Принимаем 2 сушилки.

Материальный баланс одной сушилки

$$G_2 = W_{\text{суш}} \cdot \frac{100 - w_1}{w_1 - w_2} = 5,994 \cdot \frac{100 - 50}{50 - 16} = 8,815 \text{ т/ч},$$

$$G_1 = W_{\text{суш}} \cdot \frac{100 - w_2}{w_1 - w_2} = 5,994 \cdot \frac{100 - 16}{50 - 16} = 14,809 \text{ т/ч}.$$

Параметры сушильного агента до и после сушки:

$t_0 = 30^\circ$ ;  $\varphi_0 = 50\%$ ;  $d_0 = 13,592$  г/кг сух.;  $I_0 = 64,82$  кДж/кг сух.;

$t_2 = 80^\circ$ ;  $\varphi_2 = 60\%$ ;  $d_2 = 251,6$  г/кг сух.;  $I_2 = 1054,2$  кДж/кг сух.

Удельный расход сушильного агента  $\ell$ :

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_0} = \frac{1000}{251,6 - 13,59} = 4,2 \text{ кг сух./кг вл.}$$

Часовой расход сушильного агента:

$$L = \ell W_{\text{суш}} = 4,2 \cdot 5994 = 25183 \text{ кг сух./ч.}$$

Удельный объем воздуха при входе и выходе из сушилки:

$$v_0 = 4,64 \cdot 10^{-6}(273 + t) (622 + d), \text{ м}^3/\text{кг сух.}$$

Подставив указанные параметры сушильного агента до и после сушки, получим:

$$v_0^{\text{вх}} = 4,64 \cdot 10^{-6}(273 + 30) (622 + 13,59) = 0,894 \text{ м}^3/\text{кг сух.};$$

$$v_0^{\text{вых}} = 4,64 \cdot 10^{-6}(273 + 80) (622 + 251,6) = 1,431 \text{ м}^3/\text{кг сух.}$$

Объем сушильного агента при входе и выходе из сушилки:

$$V_{\text{вх}} = L v_0^{\text{вх}} = 25183 \cdot 0,894 = 22514 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$V_{\text{вых}} = L v_0^{\text{вых}} = 25183 \cdot 1,431 = 36034 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Средний объем проходящего воздуха:

$$V_{\text{ср}} = (V_{\text{вх}} + V_{\text{вых}})/2 = (22514 + 36034)/2 = 29274 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Живое сечение сушилки при коэффициенте заполнения труб сушилки  $k = 0,4$ :

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n \cdot (1 - 0,4) = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 876 \cdot (1 - 0,4) = 4,126 \text{ м}^2.$$

Средняя скорость сушильного агента в сушилке (м/с):

$$V_{\text{ср}}/(F \cdot 3600) = 29274/(4,126 \cdot 3600) = 1,97 \text{ м/с}.$$

Определим затраты тепла на 1 кг испаренной влаги (кДж/кг вл.):

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5,$$

$q_1 = I''_{\text{п}} - C_{\text{вд}} \Theta_1$ , где теплоемкость воды  $C_{\text{вд}} = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$$I''_{\text{п}} = 2501 + C_{\text{п}} t_2 = 2501 + 1,86 \cdot 80 = 2650,$$

где  $C_{\text{п}}$  – теплоемкость пара;  $C_{\text{п}} = 1,86 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$$q_1 = 2650 - 4,19 \cdot 15 = 2587 \text{ кДж}/\text{кг вл.};$$

$$q_2 = I[C_{\text{в}}(t_2 - t_0) + 0,001 d_0 (i''_{\text{п}} - i_{\text{п}0})],$$

где  $C_{\text{в}}$  – теплоемкость воздуха,  $C_{\text{в}} = 10036 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$$i_{\text{п}0} = 2501 + C_{\text{п}} t_0 = 2501 + 1,86 \cdot 30 = 2557;$$

$$q_2 = 4,2[1,0036(80 - 30) + 0,001 \cdot 13,59(2650 - 2557)] = 216 \text{ кДж}/\text{кг вл.};$$

$$q_3 = \frac{G_2}{W} C_M (\vartheta_2 - \vartheta_1); \quad C_M = C_{\text{сух}} \frac{100 - \vartheta_2}{100} + C_{\text{вд}} \frac{\vartheta_2}{100},$$

где  $C_{\text{сух}}$  – теплоемкость сухого торфа ( $C_{\text{сух}} = 1,73 \dots 1,93$  кДж/(кг·К).

Принимаем  $C_{\text{сух}} = 1,83$  кДж/(кг·К);

$$C_M = 1,83 \frac{100 - 86}{100} + 4,19 \frac{16}{100} = 2,21 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

$$q_3 = \frac{8815}{5994} \cdot 2,21(80 - 30) = 162 \text{ кДж/кг вл.}$$

Так как конструкция барабанной паровой трубчатой сушилки не предусматривает транспортирующих устройств для сушики, то  $q_4 = 0$ .

Потери в окружающую среду примем  $q_5 = 170$  кДж/кг вл.

Общие затраты тепла на 1 кг испаренной влаги:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 2587 + 162 + 0 + 170 = 3135 \text{ кДж/кг вл.}$$

Удельный расход греющего пара  $q_{\text{п}}$  для сушильного процесса:

$$q_{\text{п}} = \frac{q}{i_{\text{п}} - i_{\text{конд}}},$$

где  $i_{\text{п}}$  – теплоемкость сухого насыщенного пара, зависящая от давления и температуры;

$i_{\text{конд}}$  – теплоемкость конденсата греющего пара.

Для паровой трубчатой сушилки можно принимать

$i_{\text{п}} = 2500 \dots 2900$  кДж/кг;  $i_{\text{конд}} = 545 \dots 590$  кДж/кг вл.

$$q_{\text{п}} = \frac{3135}{2650 - 560} = 1,5 \text{ кг/кг вл.}$$

### 10.1.3. Проверочный тепловой баланс сушилки

Тепло, вносимое греющим паром:

$$2650 \cdot q_{\text{п}} = 2650 \cdot 1,5 = 3975 \text{ кДж/кг вл.}$$

Расход тепла:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 3135 \text{ кДж/кг вл.}$$

Количество тепла, уносимое конденсатом греющего пара:

$$q_{\text{конд}} = 1,5 \cdot 550 = 825 \text{ кДж/кг вл.}$$

Итого расход тепла:  $3135 + 825 = 3960 \text{ кДж/кг вл.}$

Как видим, разница между поступлением и расходом тепла незначительная, что вполне допустимо.

#### *10.1.4. Процесс сушки на Id-диаграмме для паровой трубчатой сушилки*

При построении на *Id*-диаграмме нормального процесса сушки исходят из теоретического процесса, идущего при тех же параметрах, т.е.  $t_0$ ,  $\phi_0$ ,  $t_2$ ,  $\phi_2$  и из величины  $\Delta$ , вычисленной для действительной сушилки:

$$\Delta = C_{\text{вд}} \cdot \vartheta_1 - \sum (q_3 + q_4 + q_5).$$

Строим изотерму для начальной точки сушки *A* ( $t_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_0 = 251,6 \text{ г/кг сух.}$ ) используя формулу

$$I = (C_{\text{в}} + 0,001 d C_{\text{п}}) t + 2,5d, \text{ кДж/кг,}$$

где  $C_{\text{в}} = 1,0036 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$  – теплоемкость воздуха;  $C_{\text{п}} = 1,86 \text{ кДж/кг}\cdot\text{K}$  – теплоемкость пара.

При  $d = 0$

$$I_{30} = (1,0036 + 0,001 \cdot 0 \cdot 1,86) \cdot 30 + 2,5 \cdot 0 = 30 \text{ кДж/кг.}$$

При  $d = 200 \text{ г/кг сух.}$

$$I'_{30} = (1,0036 + 0,001 \cdot 200 \cdot 1,86) \cdot 30 + 2,5 \cdot 200 = 541,2 \text{ кДж/кг.}$$

Через полученные точки пересечений проводим изотерму  $t_0 = 30 \text{ }^\circ\text{C} = \text{const.}$

Строим изотерму для конечной точки сушки *C* ( $t_2 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_2 = 251,6 \text{ г/кг сух.}$ )

При  $d = 0$

$$I'_{80} = (1,0036 + 0,001 \cdot 0 \cdot 1,86) \cdot 80 + 2,5 \cdot 0 = 80 \text{ кДж/кг.}$$

При  $d = 200$  г/кг сух.

$$I''_{80} = (1,0036 + 0,001 \cdot 200 \cdot 1,86) \cdot 80 + 2,5 \cdot 200 = 610,0 \text{ кДж/кг.}$$

Определим масштабы для осей  $d$  и  $I$ :

для оси  $d$  – в 10 мм 50/кг сух., т.е.  $m_d = 5$  г/кг сух./мм;

для оси  $I$  – в 10 мм 100 кДж/кг, т.е.  $m_i = 10$  кДж/кг/мм.

Через полученные точки пересечений значений  $d$  и  $I$  проводим изотерму  $t_2 = 80$  °C = const.

По заданному значению  $d_0 = 13,59$  г/кг сух. определяем положение начальной точки сушки  $A$  на изотерме  $t_0 = 30$  °C = const. Проведя из точки  $A$  линию под углом 45 ° до пересечения с осью  $I$ , получим значение энтальпии  $I_0 = 65$  кДж/кг.

По другому заданному значению  $d_2 = 251,6$  г/кг сух. определяем положение конечной точки сушки  $C$  на изотерме  $t_2 = 80$  °C = const. Проведя из точки  $C$  линию под углом 45 ° до пересечения с осью  $I$ , получим значение энтальпии  $I_2$ .

Заметим, что в паротрубчатой сушилке нагрев сушильного агента идет при постоянном влагосодержании, т.е.  $d_0 = d_1$ . На графике это изображается вертикальной линией, проведенной через точку  $A$ .

Удельный расход сушильного агента  $\ell$  определяется по формуле

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_0}. \text{ Разность } d_2 - d_0 \text{ может быть выражена отрезком } CD, \text{ полученным}$$

путем проведения горизонтальной линии из точки  $C$  до пересечения с вертикальной линией, проведенной из точки  $A$ . Поэтому

$$\ell = \frac{1000}{CD \cdot m_d} = \frac{1000}{47,5 \cdot 5} = 4,2 \text{ кг сух./кг вл.}$$

что соответствует аналитическому значению  $\ell = 4,2$  кг сух./кг вл.

Рассчитаем поправку на действительную сушилку:

$$\Delta = 4,19 \cdot 15 - \sum (162 + 0 + 170) = -269 \text{ кДж/кг.}$$

Так как  $\ell(I_2 - I_1) = \Delta$ , то  $I_2 - I_1 = \Delta / \ell$ .

Выразим разность  $I_2 - I_1$  через отрезок  $CC_0$  и с учетом масштаба  $m_i$  найдем его величину в мм:

$$CC_0 = \frac{\Delta}{\ell m_i} = -\frac{269}{4,2 \cdot 10} = -6,4 \text{ мм.}$$

Величина отрезка  $CC_0$  отрицательная, поэтому откладываем этот отрезок из точки  $C$  вверх и из полученной точки  $C_0$  под углом  $45^\circ$  проводим линию до пересечения с осью  $I$  и вертикальной линией, проведенной из точки  $A$ . Первое пересечение определяет величину энтальпии  $I_1$ , а второе определяет конечную точку  $B$  нагрева сушильного агента на диаграмме  $Id$ .

$$q = \ell(I_1 - I_0).$$

С учетом масштабов и величины отрезков в мм эта формула может быть выражена из рис. 10.2:

$$q = \frac{AB}{DC} \cdot \frac{m_i}{m_d} \cdot 1000 = \frac{74,5 \cdot 10}{47,5 \cdot 5} \cdot 1000 = 3137 \text{ кДж/кг},$$

что незначительно отличается от значения затрат тепла, полученных аналитическим путем  $q = 3135 \text{ кДж/кг}$ .

Таким образом, на рис. 10.2 отрезок  $AB$  определяет величину нагрева сушильного агента от энтальпии  $I_0$  до энтальпии  $I_1$  при постоянном влагосодержании  $d_0 = d_1$ , а отрезок  $BC$  – непосредственно сушку и изменение энтальпии за счет потерь с  $I_1$  до  $I_2$ . Точка  $C$  характеризует параметры уходящего сушильного агента.

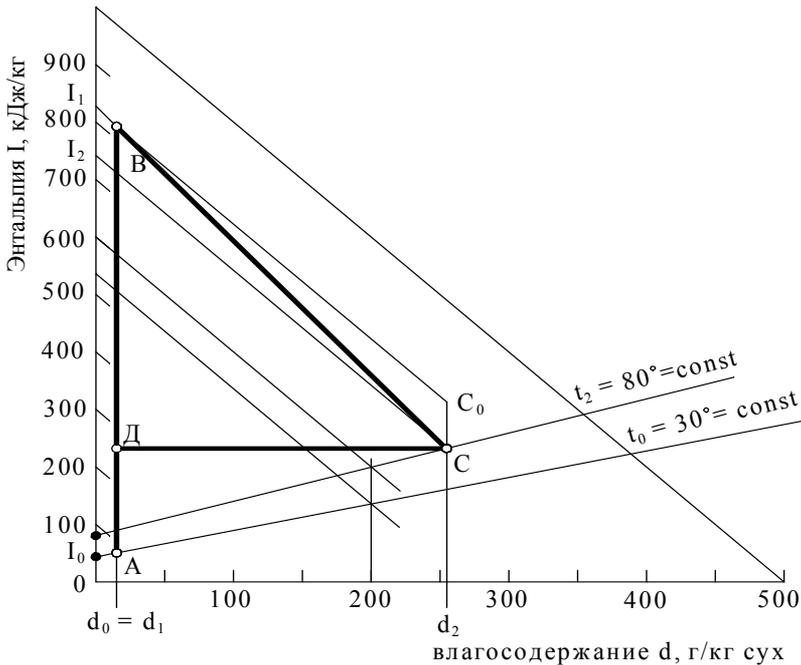


Рис. 10.2. Построение процесса сушки на  $Id$ -диаграмме для паровой трубчатой сушилки

## 10.2. Расчет пневмогазовой сушилки

### 10.2.1. Конструкция и принцип действия трубы-сушилки

Для сушки торфа преимущественное распространение получили наиболее простые по конструкции трубы-сушилки. Эти сушилки имеют вертикальную цилиндрическую трубу диаметром 0,3 - 1 м и длиной около 30 м. Труба изготавливается из листовой стали толщиной 5 - 8 мм. Нижняя часть ее через футерованное колено соединяется с топкой, вырабатывающей дымовые газы для сушки. Другой конец сушилки соединяется с аппаратами (циклонами), отделяющими высушенный торф от газового потока, далее – с вентилятором, создающим скоростной торфовоздушный поток, и со скруббером (мокрым циклоном), производящим окончательное обеспыливание торфовоздушного потока перед его выбросом в атмосферу.

Несколько выше футерованного колена в сушилку из бункера при помощи питателя загружается специально подготовленный торф влажностью не более 50 %. Увлекаемый потоком дымовых газов, он высушивается до влажности 15-20 % и осаждается в циклонах. Дымовые газы в зависимости от степени смешения с воздухом и влажности исходного сырья поступают в сушилку с температурой от 500 до 1000 °С.

Торф перед вводом в сушилку должен пройти механическую подготовку – дробление и грохочение, и его крупность не должна превышать 8 мм.

### 10.2.2. Пример расчета

Рассчитать пневмогазовую сушилку торфобрикетного завода при следующих условиях.

Годовая производительность по брикетам  $Q_{\text{год}} = 28$  тыс. т; влажность исходного торфа  $w_1 = 50$  %, высушенного –  $w_2 = 15$  %; элементный состав топлива:  $C^f = 57,8$  %;  $H^f = 6,0$  %;  $N^f = 2,5$  %;  $O^f = 33,4$  %;  $S^f = 0,3$  %; зольность  $A^c = 10$  %; температура торфа перед сушильным процессом  $\vartheta_1 = 10$  °С, после сушки –  $\vartheta_2 = 80$  °С. Наружный воздух для поддержания горения и разбавления дымовых газов имеет следующие параметры:  $t_0 = 20$  °С;  $\varphi_0 = 70$  %; температура после сушки  $t_2 = 90$  °С. Сушка материала ведется при температуре  $t_1 = 600$  °С.

**Решение.** Принимаем годовой баланс рабочего времени  $R = 7000$  ч.

Производительность завода за 1 ч рабочего времени

$$Q = Q_{\text{год}}/R = 28000 : 7000 = 4 \text{ т} = 4000 \text{ кг.}$$

Количество материала, выходящего из сушилки с учетом потерь  $\xi_2 = 3$  %:

$$G_2 = \frac{Q}{(100 - \xi_2)/100} = \frac{4000}{(100 - 3) \cdot 100} = 4124 \text{ кг/ч.}$$

Количество материала, входящего в сушилку с учетом потерь  $\xi_1 = 2\%$ :

$$G_1 = \frac{G_2}{(100 - \xi_1)/100} \cdot \frac{100 - w_2}{100 - w_1} = \frac{4124}{(100 - 2)/100} \cdot \frac{100 - 15}{100 - 50} = 7154 \text{ кг/ч.}$$

Количество влаги, испаряемой в сушилке за 1 ч:

$$W = G_1 \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2} = 7154 \frac{50 - 15}{100 - 15} = 2946 \text{ т/ч.}$$

Потери тепла на нагрев материала

$$q_3 = \frac{G_2}{W} C_m (\vartheta_2 - \vartheta_1) \text{ кДж/кг вл.}$$

$$C_m = C_{\text{сух}} \frac{100 - w_2}{100} + C_{\text{вд}} \frac{w_2}{100}, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К).}$$

Принимая теплоемкость сухого торфа  $C_{\text{сух}} = 1.9$  кДж/кг·К, получим:

$$C_m = 1,9 \frac{100 - 16}{100} + 4,19 \frac{15}{100} = 2,22 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К).}$$

$$q_3 = \frac{4124}{2946} \cdot 2,22(80 - 10) = 218 \text{ кДж/кг.}$$

Потери тепла на нагрев транспортирующих устройств  $q_4 = 0$ .

Потери тепла в окружающую среду принимаем:

$$q_5 = 180 \text{ кДж/кг вл.}$$

Сумма тепловых потерь

$$\sum q_{\text{п}} = q_3 + q_4 + q_5 = 218 + 0 + 180 = 388 \text{ кДж/кг.}$$

Для определения удельного расхода сушильного агента  $\ell$  и затрат тепла  $q$  воспользуемся  $Id$ -диаграммой, для чего рассчитаем поправку на действительную сушилку  $\Delta$ :

$$\Delta = C_{\text{вд}} \cdot \vartheta_1 - \sum q_{\text{п}} = 4,19 \cdot 10 - 388 = -346,1 \text{ кДж/кг.}$$

Определяем масштабы для осей  $d$  и  $I$ ; для оси  $d$  – в 10 мм 50 г/кг сух., т.е.  $m_d = 5 \text{ г/кг сух./мм}$ ; для оси  $I$  – в 10 мм 100 кДж/кг, т.е.  $m_I = 10 \text{ кДж/кг.}$

Пользуясь  $Id$ -диаграммой, находим влагосодержание дымовых газов  $d_1$ , вступающих в процесс сушки при температуре  $t_1 = 600$ . Этот показатель при влажности сжигаемого торфа  $w_1 = 50 \%$  составляет  $d_1 = 77 \text{ г/кг сух.}$  Так как состояние наружного воздуха определяется  $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\varphi_0 = 70^\circ$ , по таблицам находим:  $d_0 = 10,42 \text{ г/кг сух.}$  и  $I_0 = 46,5 \text{ кДж/кг.}$  По полученным координатам находим точку  $A$ , соответствующую состоянию наружного воздуха. Чтобы нанести точку  $B_1$ , характеризующую начало сушильного процесса, следует определить пересечение линий  $d_1 = 80 \text{ г/кг сух.}$  и изотермы  $t_1 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 10.3).

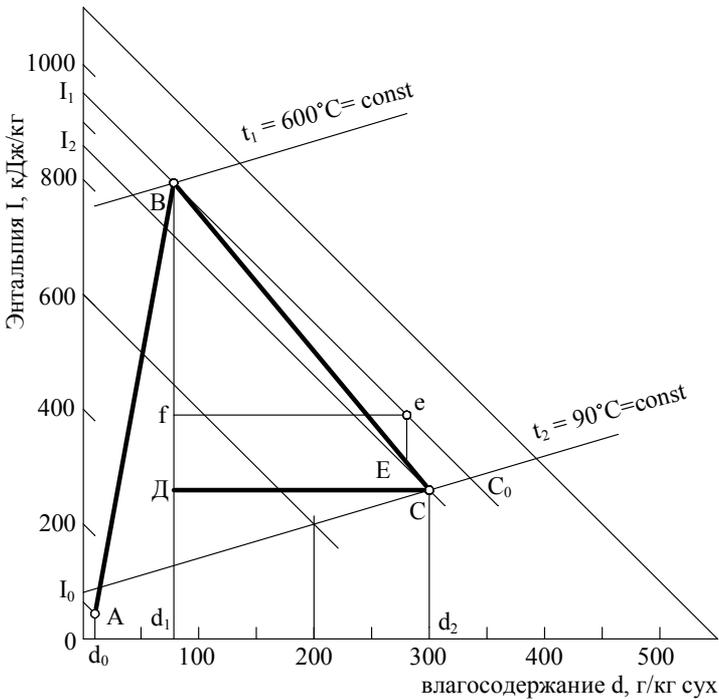


Рис. 10.3. Построение процесса сушки на  $Id$ -диаграмме для пневмогазовой трубы-сушилки

Через точку  $B$  проводим луч теоретического процесса сушки  $BC_0$  и на нем от произвольной точки  $e$  откладываем отрезок  $eE$  вниз, так как  $\Delta < 0$ . Положение точки  $e$  выбираем так, чтобы отрезок  $ef$  равнялся целому числу, например,  $ef = 40 \text{ мм}$ . Величина отрезка  $eE$  в мм определяется из выражения

$$eE = ef \frac{\Delta}{m},$$

где масштабный коэффициент  $m = \frac{m_i}{m_d} \cdot 1000 = \frac{10}{5} \cdot 1000 = 2000$ ,

$$eE = 40 \frac{-346,1}{2000} = -6,9 \text{ мм.}$$

Соединяем точки  $B$  и  $E$  и продолжаем прямую до пересечения с изотермой  $t_2 = 90^\circ\text{C}$ . Изотерму строим, используя формулу

$$I = (C_B + 0,001 \cdot d \cdot C_n) t + 2,5d, \text{ кДж/кг.}$$

При  $d = 0$   $I'_{90} = (1,0036 + 0,001 \cdot 0 \cdot 1,86) \cdot 90 + 2,5 \cdot 0 = 30 \text{ кДж/кг.}$

При  $d = 200 \text{ г/кг сух.}$   $I''_{90} = (1,0036 + 0,001 \cdot 200 \cdot 1,86) \cdot 90 + 2,5 \cdot 200 = 623,8 \text{ кДж/кг.}$

Изотерму  $t_1 = 600^\circ\text{C}$  проводим через найденные точки пересечения, а пересечение луча  $BE$  обозначаем точкой  $C$ . Процесс построен и изображается ломаной  $ABC$ , причем отрезок  $AB$  изображает процесс смешения наружного воздуха с дымовыми топочными газами, а отрезок  $BC$  – действительный луч процесса сушки.

Опустив перпендикуляр из точки  $C$ , получаем  $d_2 = 300 \text{ г/кг сух.}$

Расход сушильного агента находим аналитическим способом:

$$\ell = \frac{1000}{d_2 - d_1} = \frac{1000}{300 - 77} = 4,48 \text{ кг сух./кг вл.}$$

Расход сушильного агента из графических построений на  $Id$ -диаграмме

$$\ell = \frac{1000}{CD} = \frac{1000}{m_d \cdot 44,6 \cdot 5} = 4,48 \text{ кг сух./кг вл.}$$

Следовательно, расчет произведен правильно. Общий расход тепла

$$q = \frac{FD'}{CD} \cdot \frac{m_I}{m_d} \cdot 1000 = \frac{90 \cdot 10 \cdot 1000}{44,6 \cdot 5} = 4104 \text{ кДж/кг вл.}$$

Расход сушильного агента за 1 ч

$$L = l \cdot W = 4,48 \cdot 2946 = 13198 \text{ кг сух./ч.}$$

Удельный объем сушильных газов при входе в сушилку

$$V_0^{\text{BX}} = 4,64 \cdot 10^{-6}(273 + T)(622 + d) = 4,64 \cdot 10^{-6}(273 + 600) \times \\ \times (622 + 77) = 2,83 \text{ м}^3/\text{кг сух.}$$

Объем сушильного агента при входе в сушилку

$$V^{\text{BX}} = L \cdot V_0^{\text{BX}} = 13198 \cdot 2,83 = 37350 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Диаметр трубы-сушилки определяется по заданной скорости, которая обычно находится в интервале 25-30 м/с. Выбираем  $v = 28$  м/с. Так как  $v = V/(3600 \cdot F_{\text{тр}})$ , м/с, то площадь сечения трубы-сушилки

$$F_{\text{тр}} = V/(3600 \cdot v) = \frac{\pi D_{\text{тр}}^2}{4} / (3600 \cdot v).$$

Диаметр трубы-сушилки определится по формуле

$$D_{\text{тр}} = \sqrt{\frac{4V}{3600 \cdot v \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 37350}{3600 \cdot 28 \cdot \pi}} = 0,687 \text{ м.}$$

Принимаем  $D_{\text{тр}} = 0,7 \text{ м} = 700 \text{ мм}$ .

Длину трубы устанавливаем по напряжению  $A$ , которое показывает количество влаги, испаряемой в  $1 \text{ м}^3$  сушильного пространства в течение 1 ч. Обычно  $A = 180 \dots 320 \text{ кг вл./}(m^3 \cdot \text{ч})$ . Принимаем  $A = 260 \text{ кг вл./}(m^3 \cdot \text{ч})$ .

Объем сушильного пространства трубы

$$V_{\text{тр}} = \frac{W}{A} = \frac{2946}{260} = 11,33 \text{ м}^3.$$

Сечение трубы  $F_{\text{тр}} = \pi D_{\text{тр}}^2 / 4 = 3,14 \cdot 0,7^2 / 4 = 0,385 \text{ м}^2$ .

Длина трубы  $L_{\text{тр}} = V_{\text{тр}} / F_{\text{тр}} = 11,33 / 0,385 = 29,4 \text{ м}$ .

Произведем аналитический проверочный расчет расходного баланса тепла по отдельным элементам.

Расход тепла на испарение влаги

$$q_1 = i''_{\text{п}} - C_{\text{вд}} \cdot \vartheta_1;$$

$$i''_{\text{п}} = 2501 + C_{\text{п}}t_2 = 2501 + 1,86 \cdot 90 = 2668,4 \text{ кДж/кг};$$

$$q_1 = 2668,4 - 4,19 \cdot 20 = 2584,6 \text{ кДж/кг вл.}$$

Расход тепла на нагрев газа для пневмогазовой сушилки

$$q_2 = l [C_{\text{в}}(t_2 - t_0) + 0,001(d_1 \cdot i''_{\text{п}} - d_0 \cdot i_{\text{п0}})];$$

$$i_{\text{п0}} = 2501 + C_{\text{п}}t_0 = 2501 + 1,86 \cdot 20 = 2538,2 \text{ кДж/кг};$$

$$q_2 = 4,48 [1,0036(90 - 20) + 0,001(77 \cdot 2668,4 - 10,42 \cdot 2538,2)] = 1117 \text{ кДж/кг.}$$

Расход тепла на нагрев материала  $q_3 = 218 \text{ кДж/кг}$ .

Расход тепла на нагрев транспортирующих устройств  $q_4 = 0$ .

Потери тепла в окружающую среду принимаем  $q_5 = 180 \text{ кДж/кг}$ .

Общий расход тепла составит

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 2584,6 + 1117 + 218 + 0 + 180 = 4100 \text{ кДж/кг вл.}$$

Расчет с помощью *Id*-диаграммы для  $q = 4104 \text{ кДж/кг вл.}$  практически совпадает с аналитическим расчетом.

КПД сушилки

$$\eta_{\text{сут}} = q_1 \cdot 100/q = 2584,6 \cdot 100/4104 = 63 \text{ \%}.$$

Часовой расход тепла

$$Q = Wq = 2946 \cdot 4104 = 12,09 \text{ МДж/ч.}$$

Часовой расход топлива  $P_{\text{топл}}$  определим по часовому количеству абсолютно сухого агента и по выходу сухих газов при сжигании 1 кг топлива:

$$G_{\text{сух.г}} = 1 + \alpha L_0 - \frac{A^{\text{P}} + w^{\text{P}} + 9H^{\text{P}}}{100} \text{ кг/кг топлива.}$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  для поддержания горения и разбавления дымовых газов до  $t_1 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  определяем по *Id*-диа-грамме:  $\alpha = 3,3$ .

Определим состав топлива (торфа) на рабочую массу:

$$A^P = \frac{A^c(100 - w^P)}{100} = \frac{10(100 - 50)}{100} = 5\%;$$

$$C^P = \frac{C^r(100 - w^P - A^P)}{100} = \frac{57,8(100 - 50 - 5)}{100} = 26,0\%;$$

$$H^P = \frac{H^r(100 - w^P - A^P)}{100} = \frac{6 \cdot 45}{100} = 2,7\%;$$

$$Q^P = \frac{31,2 \cdot 45}{100} = 14,04; \quad N^P = \frac{2,5 \cdot 45}{100} = 1,125; \quad S^P = \frac{2,5 \cdot 45}{100} = 1,135\%.$$

Теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг топлива

$$L_0 = 0,115 \cdot C^P + 0,345 H^P - 0,043(O^P - S^P) = 0,115 \cdot 26 + 0,345 \cdot 2,7 - 0,043(14,04 - 1,135) = 3,37 \text{ кг/кг топл.}$$

$$G_{\text{сух.г}} = 1 + 3,3 \cdot 3,37 - \frac{5 + 50 + 9 \cdot 2,7}{100} = 11,33 \text{ кг/кг топл.}$$

Количество сжигаемого топлива для процесса сушки

$$P_{\text{топл}} = \frac{L}{G_{\text{сух}}} = \frac{13198}{11,33} = 1165 \text{ кг/ч.}$$

### 10.3. Расчет индукционной сушилки с использованием тока промышленной частоты

#### 10.3.1. Принцип действия

Задача термической сушки состоит в том, чтобы быстро высушить материал с наилучшими технологическими показателями при минимальных затратах тепла и электроэнергии и, следовательно, найти оптимальный режим. В практике находит применение электромагнитный способ подвода тепла к материалу с использованием тока промышленной частоты. Сущность индукционного нагрева и сушки заключается в том, что материал вместе с ферромагнитными элементами помещается в переменное электромагнитное поле катушки. Ферромагнитные элементы в электромагнитном поле за счет перемагничивания и вихревых токов нагреваются. Передача тепла от ферромагнитных элементов

осуществляется контактно, конвекцией или терморрадиацией без промежуточных сопротивлений. При этом возникают два одновременно протекающих и взаимосвязанных процесса: кондуктивный теплообмен между ферромагнитными элементами и влажным материалом и изменение агрегатного состояния вещества (парообразование в контактном поле), сопровождающееся поглощением теплоты фазового превращения и переносом пара к свободной поверхности материала. Аналитические и экспериментальные исследования показали, что на перенос тепла, жидкости и газа в дисперсных, реологических и капиллярно-пористых средах оказывают влияние внешнее электрическое и магнитное поле. Это следует также из того, что влажные дисперсные и капиллярно-пористые среды являются релаксационно-поляризованными системами, в которых приложенное внешнее электрическое или магнитное поле релаксируется с конечной скоростью. В таких системах перенос тепла и массы вещества может происходить не только под действием градиентов температуры и влаго-содержания, но и под действием электромагнитного поля.

Исследованиями закономерностей переноса тепла и влаги при термической обработке и сушке налагающим внешним электромагнитным полем также установлено, что в течение очень короткого промежутка времени температура тела или среды в объеме устанавливается с постоянным относительно небольшим градиентом температуры, величина которого постоянна в течение всего периода нагрева. Причем установление постоянного градиента температуры при воздействии внешнего магнитного поля происходит значительно быстрее, чем без его воздействия. Нагрев капиллярнопористых тел происходит также относительно равномерно с одинаковой скоростью по всему объему.

Принципиальная электрическая схема установки приведена на рис. 10.4, а глубина проникновения электромагнитных волн – на рис. 10.5.

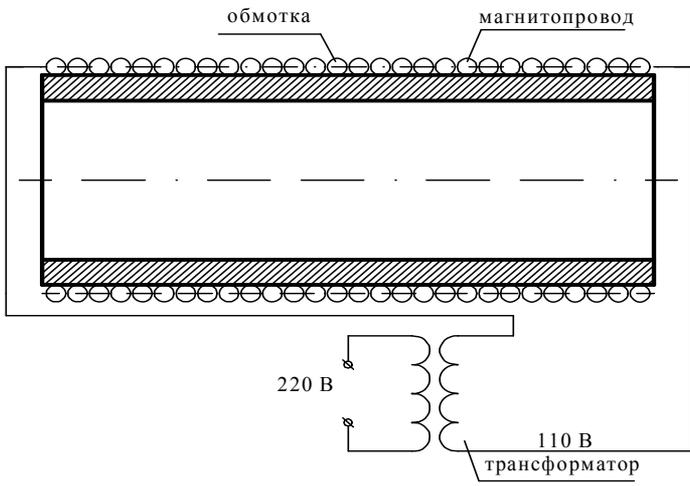


Рис. 10.4. Принципиальная электрическая схема включения трубы в сеть

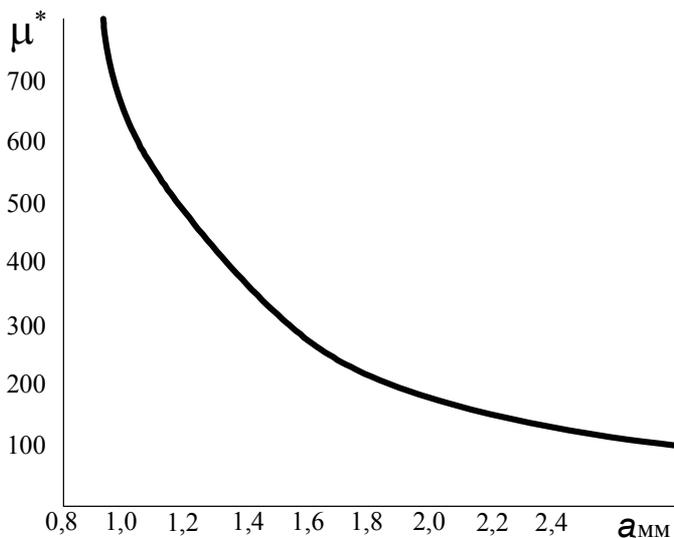


Рис. 10.5. Зависимость глубины проникновения электромагнитных волн в металл (Ст3) от магнитной проницаемости  $\mu^*$ ;  $\mu = \mu_1 \mu^*$ , где  $\mu = 12,54 \cdot 10^{-7}$

### 10.3.2. Расчет параметров индукционной установки

Расчет индукционного нагрева магнитопровода сводится к определению количества витков  $n$ , требующегося для создания при заданном напряжении  $U$  такой напряженности магнитного поля  $H$ , при которой обеспечивалось бы тепловыделение, необходимое для сушки проходящего через магнитопровод материала. С этой целью сначала устанавливают требуемую для создания определенной температуры сушки электрическую мощность:

$$P = C_T \gamma_T v V_T + C_{мп} \gamma_{мп} \delta_{мп} M_{п} \frac{v}{2} V_M + \left[ \frac{(t_c + t_{нт}) - 2t_{нв}}{2} \cdot V_k \right] - 800 V_k, \quad (10.1)$$

где  $P$  – требуемая электрическая мощность, Вт;

$C_T$  – удельная теплоемкость торфа, Дж/кг-град;

$\gamma_T$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость подъема температуры, град/с;

$C_{мп}$  – удельная теплоемкость магнитопровода (сталь Ст3), Дж/кг-град.

$\gamma_{мп}$  – вес единицы объема металла магнитопровода (сталь Ст3), кг/м<sup>3</sup>;

$\delta_{мп}$  – толщина магнитопровода (трубы), м;

$M_{\text{п}}$  – модуль поверхности конструкции, 1/м;  
 $t_{\text{с}}$  – температура сушки, град;  
 $t_{\text{нт}}$  – температура материала до сушки, град;  
 $t_{\text{н.в}}$  – начальная температура воздуха, град;  
 $V_{\text{к}}$  – объем нагреваемой конструкции (магнитопровода с торфом), м;  
 $V_{\text{т}}$  – объем материала в магнитопроводе, м<sup>3</sup>;  
 $V_{\text{м}}$  – объем металла магнитопровода, м<sup>3</sup>.

Удельная теплоемкость материала зависит от содержания в нем влаги. Например, для торфа она определяется по формуле

$$C_{\text{т}} = C_{\text{нт}} + (C_{\text{в}} - C_{\text{нт}}) \frac{w}{100}, \quad (10.2)$$

где  $C_{\text{нт}}$  – удельная теплоемкость сухого торфа, не зависящая от вида, степени разложения и переработки торфа и равная  $1,96 \cdot 10^3$  Дж/кг·град;

$C_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды, равная  $4,19 \cdot 10^3$  Дж/кг·град;

$w$  – влажность торфа, %.

Модуль поверхности конструкции  $M_{\text{п}}$  есть отношение тепловыделяющей поверхности магнитопровода (трубы) к ее объему. Величина тепловыделяющей поверхности трубы  $F$  в м<sup>2</sup> составит:

$$F = \pi l (d_{\text{н}} + d_{\text{в}}), \quad (10.3)$$

где  $l$  – длина магнитопровода, м;

$d_{\text{н}}$  – наружный диаметр магнитопровода, м;

$d_{\text{в}}$  – внутренний диаметр магнитопровода, м.

В случае, когда толщина трубы больше глубины проникновения электромагнитных волн и они полностью затухают в толще металла, в формуле (10.3) учитывают только наружный диаметр магнитопровода. Поэтому в целях увеличения поверхности тепловыделения толщина стенки трубы, используемой для магнитопровода, не должна превышать 2-3 мм.

После определения тепловыделяющей поверхности рассчитывают ее удельную тепловую мощность, необходимую для нагрева конструкции:

$$\Delta P = \frac{P}{F}, \quad (10.4)$$

где  $\Delta P$  – удельная тепловая мощность, Вт/м<sup>2</sup>.

Зная  $\Delta P$ , по рис. 10.6 находят требуемую напряженность магнитного поля  $H$  и сопротивление 1 м<sup>2</sup> тепловыделяющей поверхности. Поскольку напряженность поля обусловлена общим сопротивлением индуктора и магнитопровода, далее определяют составляющие общего сопротивления, приводя их к 1 м

длины индуктора  $h$ . При этом данную систему рассматривают как воздушный трансформатор. Первичной обмоткой такого трансформатора является индуктор, а вторичной – магнитопровод (рис. 10.7).

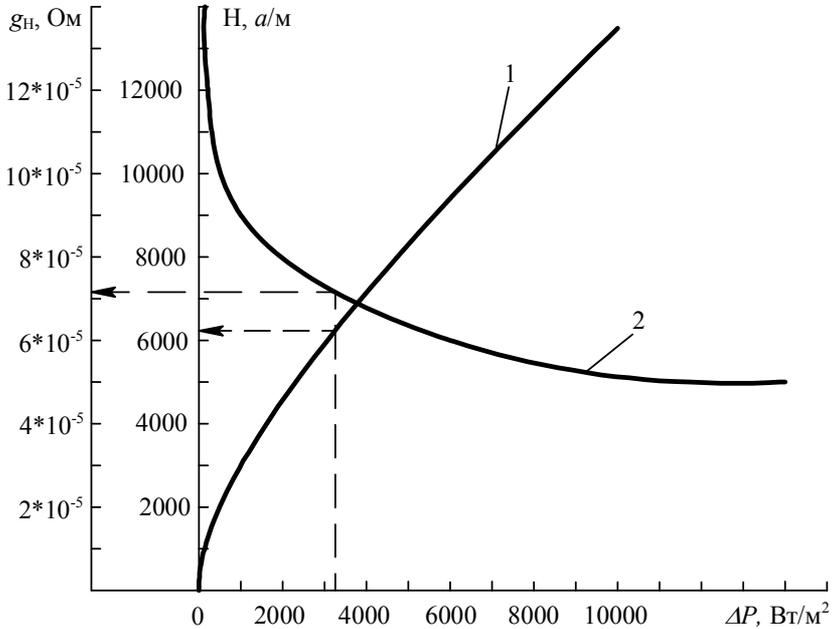


Рис. 10.6. Зависимость напряженности магнитного поля  $H$  (кривая 1) и сопротивления  $1 \text{ м}^2$  поверхности магнитопровода  $g_n$  (кривая 2) от удельной мощности  $\Delta P$  для сталей марки Ст3 и Ст5

Активное сопротивление индуктора в омах можно определить по формуле

$$r_i = \sqrt{2\pi R_i} \sqrt{w\mu_0 g_i} \frac{n^2}{h^2}, \quad (10.5)$$

где  $R_i$  – радиус индуктора, м;

$\omega$  – угловая частота тока,  $\omega = 2\pi f$ , Гц;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость пустоты, равная  $12,56 \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$g_i$  – удельное сопротивление материала индуктора (для меди  $g_i = 0,02 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, для алюминия  $g_i = 0,035 \cdot 10^{-6}$ );

$n$  – число витков индуктора, шт.;

$h$  – высота индуктора, м.

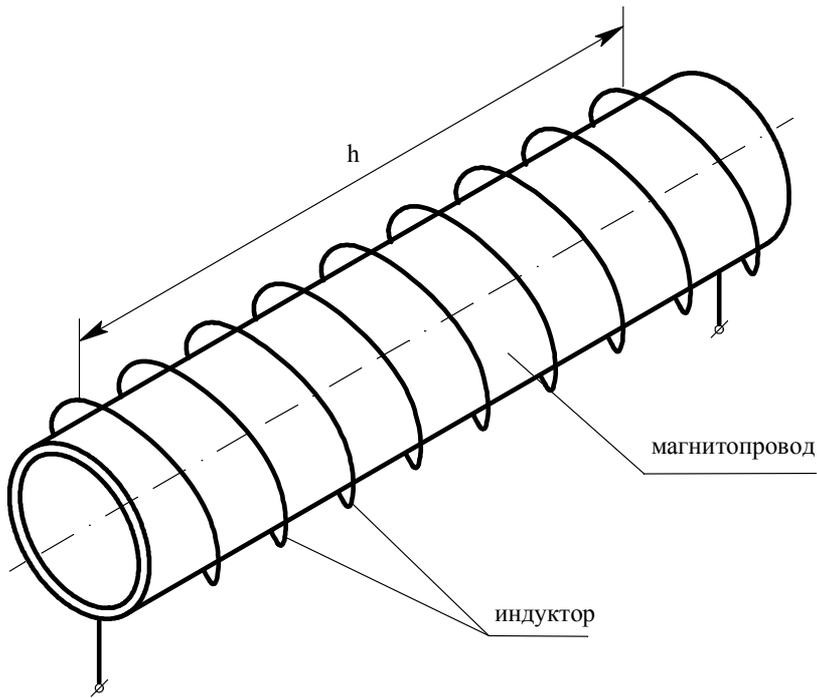


Рис. 10.7. Принципиальная электрическая схема индукционной установки

Индуктивное сопротивление индуктора  $\omega L_i$  в омах составит:

$$\omega L_i = \pi R_i^2 \omega \mu_0 \alpha \frac{n^2}{h^2}, \quad (10.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от отношения высоты (длины) индуктора к его радиусу (определяется по рис. 10.8);

$S$  – площадь поперечного сечения индуктора,  $\text{м}^2$ .

Активное и индуктивное сопротивление магнитопровода определяют по формуле

$$r_s = \omega L_i = \rho g_n \frac{n^2}{h^2}, \quad (10.7)$$

где  $\rho$  – периметр магнитопровода, равный  $2\pi R$ ;

$g_n$  – сопротивление  $1 \text{ м}^2$  поверхности магнитопровода.

Полное сопротивление системы (индуктор – магнитопровод) на 1 м длины составит:

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}, \quad (10.8)$$

где  $r$  и  $\omega L$  – соответственно активное и индуктивное сопротивление на 1 м системы.

Приняв  $Z_0 = Z \frac{h^2}{n^2}$  и задавшись напряжением  $U$ , определяют число витков индуктора:

$$n = \frac{U}{Z_0 H}. \quad (10.9)$$

После этого вычисляют силу тока в индукторе

$$I = \frac{H \cdot h}{n}. \quad (10.10)$$

По величине силы тока подбирают сечение провода индуктора (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Сила тока, А	Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Сила тока, А	Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Сила тока, А	Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>
Медный провод					
41	4	100	25	330	95
50	6	170	35	385	120
80	10	215	50	440	150
100	16	270	70	510	185
Алюминиевый провод					
32	4	105	25	255	95
39	6	130	35	295	120
55	10	165	50	340	150
80	16	210	70	390	185

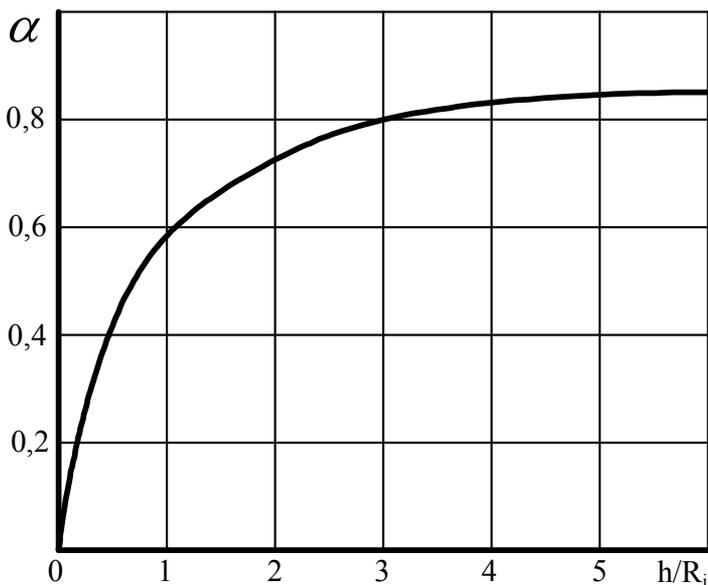


Рис. 10.8. Зависимость коэффициента формы индуктора  $\alpha$  от отношения высоты (длины) к радиусу индуктора  $h/R_i$

Согласно теории индукционного нагрева напряженность магнитного поля  $H$  уменьшается по длине индуктора  $h$  от центра к краям. Следовательно, и тепловая мощность у краев будет меньше на величину  $H^2$ . Чтобы исключить это явление, витки индуктора укладывают по длине магнитопровода с различным шагом. Величину шага определяют методом зонального расчета. По данным А.М. Ро-дигина, напряженность магнитного поля в точке  $a$  на расстоянии  $X_1$  и  $X_2$  от торцов составляет

$$H_a = \frac{H}{2} (A_1 + A_2), \quad (10.11)$$

где  $H$  – напряженность поля, равная  $nI/h$ ;

$A_1$  и  $A_2$  – безмерные величины, зависящие от  $n$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , причем

$$\begin{aligned} A_1 &= f(n_1) \beta_1, \\ A_2 &= f(n_2) \beta_2. \end{aligned} \quad (10.12)$$

Величины  $n$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  характеризуют положение точки  $a$  и определяются по формулам

$$n = \frac{UR_i \cdot R_a}{(R_i + R_a)^2};$$

$$\beta_1 = \frac{(R_i + R_a)^2}{(R_i + R_a)^2 + X_2^2}; \quad (10.13)$$

$$\beta_2 = \frac{(R_i + R_a)^2}{(R_i + R_a)^2 + X_2^2}.$$

Величины  $A_1$  и  $A_2$  находят по рис. 10.9.

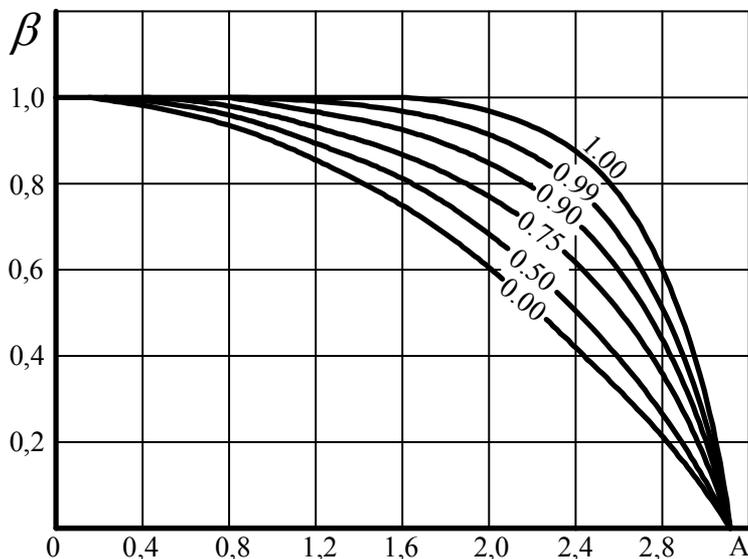


Рис. 10.9. Зависимость  $A$  от  $\beta$  и  $n$

Таким образом, значение напряженности магнитного поля можно определить для любой точки по длине магнитопровода.

Чтобы компенсировать уменьшение тепловых потерь в торцах магнитопровода, всю его длину следует разбить на ряд участков и на каждом участке уложить количество витков, определяемое по формуле

$$n_k = \frac{nm_k h_k}{\sum_{R=1}^n h_k m_k^2}. \quad (10.14)$$

Излишними витками ( $n_k - n$ ) компенсируют тепловые потери на концах магнитопровода. Таким образом достигается равномерность нагрева по длине.

### 10.3.3. Пример расчета количества витков и сечения провода индуктора

Исходные данные:

диаметр магнитопровода  $d_H = 0,5$  м;

длина магнитопровода  $l_M = 3,0$  м;

толщина стенки магнитопровода  $h_1 = 0,004$  м;

материал магнитопровода – сталь Ст3;

диаметр индуктора  $d_I = 0,6$  м;

длина индуктора  $h = 3,0$  м;

материал индуктора – алюминий;

подаваемое на индуктор напряжение – 127 В;

объем торфа в индукторе при  $w = 70\%$  –  $V_T = 0,1$  м<sup>3</sup>;

модуль поверхности конструкции  $M_{\Pi} = 4,55$  1/м.

Удельная теплоемкость торфа при влажности 70 %

$$C_M = 1,96 \cdot 10^3 + (4,18 \cdot 10^3 - 1,96 \cdot 10^3) \frac{70}{100} = 352 \text{ кДж/кг·град.}$$

Тепловыделяющая поверхность трубы

$$F = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 2 = 9,42 \text{ м}^2.$$

Объем нагреваемой конструкции

$$V = \frac{3,14 \cdot 0,5^2 \cdot 3}{4} = 0,588 \text{ м}^2.$$

Модуль поверхности конструкции

$$M_{\Pi} = \frac{9,42}{0,588} = 16.$$

Объем металла магнитопровода

$$V_M = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 3 \cdot 0,004 = 0,0188 \text{ м}^3.$$

Требуемая электрическая мощность

$$P = 3521 \cdot 480 \cdot 0,1 + 460 \cdot 7800 \cdot 0,004 \cdot 160,05 \cdot 0,0188 + \\ + \frac{(180 + 20) - 2 \cdot 20}{2} \cdot 0,588 - 800 \cdot 0,588 = 16694 \text{ Вт}.$$

Удельная тепловая мощность

$$\Delta P = \frac{16694}{9,42} = 1772 \text{ Вт/м}^2.$$

По рис. 10.7 находим:  $H = 4500 \text{ А/м}$  и  $q_H = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$ .

Тогда

$$r = \sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 0,3 \sqrt{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 0,035^{-6}} \cdot \frac{n^2}{h^2} = 87,488 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2};$$

$$\omega L = 3,14 \cdot 0,3^2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} \cdot 0,9 \cdot \frac{n^2}{h^2} = 100,3 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2};$$

$$r_S = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 8 \cdot 10^{-5} \frac{n^2}{h^2} = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2};$$

$$Z = \sqrt{87,488 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2}^2 + 100,3 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2}^2} = 133,1 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2};$$

$$Z_0 = 133,1 \cdot 10^{-6} \frac{n^2}{h^2} \cdot \frac{h^2}{n^2} = 133,1 \cdot 10^{-6} = 0,133 \cdot 10^{-3}.$$

Количество витков индуктора

$$n = \frac{127}{0,133 \cdot 10^{-3} \cdot 4500} = 212.$$

Сила тока в индукторе

$$I = \frac{4500 \cdot 3}{212} = 63,68 \text{ А},$$

$\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м:

Удельная электрическая проводимость для материала трубы (Ст3) составляет  $6,8 \cdot 10^6$  1/Ом·м. Магнитная проницаемость  $\mu$  определялась по выражению, полученному из решений линейных уравнений Максвелла  $E = -\mu \frac{dH}{dt}$ , применительно к данной схеме включения установки в электрическую сеть (см. рис. 10.4):

$$\mu = \frac{E}{4,44 \cdot H_m \cdot f \cdot S \cdot n}, \quad (10.15)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м;

$E$  – напряженность электрического поля, В/м;

$H_m$  – напряженность магнитного поля, В/м;

$f$  – частота тока, Гц;

$S$  – площадь сечения магнитопровода (трубы), м<sup>2</sup>;

$n$  – число витков обмотки, шт.

Как показали исследования, магнитная проницаемость зависит от марки стали и напряженности магнитного поля на поверхности трубы. Данная зависимость представлена на рис. 10.10, из которой видно, что с увеличением напряженности поля до 700-800 А/м происходит возрастание модуля проницаемости. Дальнейшее увеличение напряженности ведет к снижению модуля проницаемости, и при напряженности поля 10585 А/м для стали Ст3 (наши условия) эта величина составит примерно 100 Гн/м. Тогда глубина проникновения электромагнитных волн в металл трубы, а следовательно и оптимальная толщина ее стенки, составит:

$$a = \sqrt{\frac{2}{6,28 \cdot 50 \cdot 6,8 \cdot 10 \cdot 100 \cdot 12,54 \cdot 10}} = 2,7 \text{ мм}.$$

Зависимость глубины проникновения электромагнитных волн в металл трубы из стали Ст3 от величины модуля магнитной проницаемости показана на рис. 10.10.

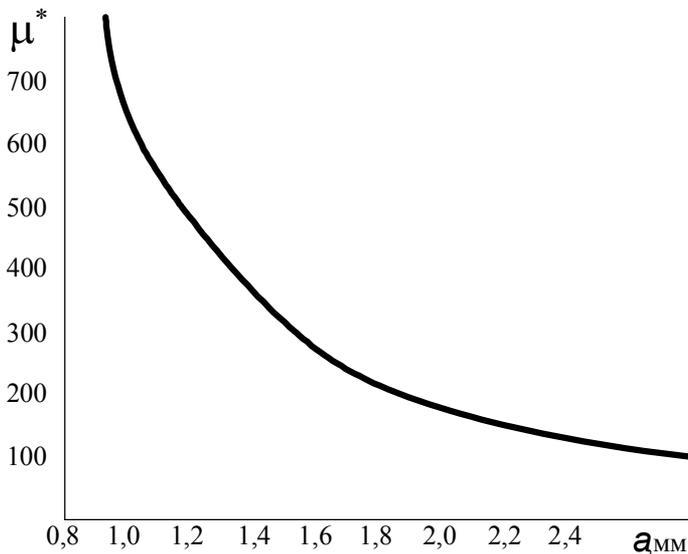


Рис. 10.10. Зависимость глубины проникновения электромагнитных волн в металл (Ст3) от магнитной проницаемости

## 11. УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

При проектировании процесса сушки горных пород важное значение имеет обеспечение пожаро- и взрывобезопасной работы сушильных установок. Особенно это относится к сушке таких материалов как торф, сланцы, бурые и каменные угли, кокс, лигнин и т.п. Являясь пожароопасными материалами, они относятся к категории взрывоопасных.

Процесс взрыва пыли указанных твердых топлив представляет собой интенсивное горение газифицированных летучих веществ. В зависимости от условий горения скорость распространения пламени при взрыве колеблется от нескольких десятков до сотен метров в секунду. Бурное горение пыли сопровождается местным повышением давления, следующим за фронтом пламени, и представляет собой взрывную волну.

Образование взрывной волны с большой скоростью ее распространения возможно при значительных отложениях высокодисперсной пыли. При возникновении загорания местного значения и появлении небольшого хлопка отложения пыли быстро переходят во взвешенное состояние с образованием значительных концентраций, способных вызвать более сильный взрыв.

Ударная волна опережает фронт пламени и по пути своего движения переводит во взвешенное состояние новые отложения пыли. Взрывной эффект значительно усиливается.

В заводских помещениях взрывная волна в первую очередь разрушает оконные проемы, затем слабые места кровли и даже стены. Появление широкого фронта пламени весьма опасно для обслуживающего персонала.

Изучение взрываемости топливной пыли позволило выявить наиболее важные факторы, влияющие на развитие взрыва: источник воспламенения, влажность пыли, размер частиц, концентрация пыли в газовой среде, содержание кислорода, влагосодержание аэрозвесей, содержание двуокси углерода, температура среды и начальное давление в объеме. Источниками воспламенения пыли могут быть горящие частицы, непосредственное воздействие пламени, искра электрического или иного происхождения. Часто воспламенение, например, торфяной пыли происходит от тлеющих очагов торфа. Эти очаги в большинстве случаев являются результатом самовозгорания откладывающейся пыли, длительное время находящейся в соприкосновении с источником тепла. Отложения пыли обычно получают при наличии горизонтальных или слабо наклонных участков, "мертвых пространств" в производственных помещениях и неудачно спроектированном технологическом оборудовании. Взрывы пыли в сушильных установках происходят, как правило, при пуске, когда тлеющие очаги взрыхляются мощным газовым потоком.

Взрывоопасность любой пыли возрастает с понижением ее влажности. Как показали опыты, торфяная пыль способна к взрыву в основном при влажности менее 25 %, что соответствует влажности торфяной сушенки, предназначенной для производства брикетов. Поэтому торфяную сушенку, особенно ее пылевую фракцию, следует считать взрывоопасным материалом.

Дисперсность пыли является одним из важнейших факторов, определяющих ее взрывоопасность. Многочисленные опыты, проведенные с пылью различных материалов, показывают, что взрываемость пыли уменьшается с угрублением ее помола. Более тонкая фракция пыли имеет большую удельную поверхность, поэтому легче прогревается. Крупные же фракции пыли способны поглощать теплоту от источника и тем самым затормаживают развитие процесса горения. Добавленные к тонкой пыли крупные фракции играют роль инертных частиц, задерживающих воспламенение смеси.

Максимальная концентрация пыли, выше которой взрыва не происходит, зависит от природы материала. Для бурых углей она составляет  $5-6 \text{ кг/м}^3$ , для каменных углей –  $3-4 \text{ кг/м}^3$ , для торфа –  $13-16 \text{ кг/м}^3$ .

При определенных соотношениях крупной и мелкой пыли развитие взрыва может оказаться невозможным. Так, для бурых и каменных углей при содержании 30 % частиц размером более 0,2 мм пылевоздушная смесь считается взрывобезопасной. Размер частиц торфяной пыли, равный 0,15 мм, можно принять пределом ее воспламенения (взрыва).

Концентрация пыли в газовом потоке является одним из основных факторов, влияющих на развитие взрыва. Пыль твердых топлив при наличии благоприятных условий взрыва может воспламениться лишь при определенных ее концентрациях в газовой среде. Пыль в виде аэрозольной смеси по концентрации характеризуется нижним и верхним пределами воспламеняемости (взрываемости). Например, нижний предел воспламеняемости торфяной пыли составляет  $0,05-0,15 \text{ кг/м}^3$ , в некоторых случаях минимальная концентрация снижается до  $0,01 \text{ кг/м}^3$ .

При увеличении концентрации пыли в газовом потоке выше минимального значения вероятность взрыва возрастает. Наиболее опасные концентрации для различных видов топлива находятся в пределах  $0,4-2,0 \text{ кг/м}^3$ .

Содержание кислорода в аэровзвеси является одним из важнейших факторов, влияющих на развитие взрыва пыли. Кислород – наиболее реагирующее вещество, способствующее образованию взрывоопасной смеси. Поэтому необходимо стремиться к снижению в сушильном агенте содержания свободного кислорода и к увеличению двуокиси углерода  $\text{CO}_2$  (углекислого газа) или другого инертного газа.

Предельное содержание кислорода, при котором не возникает взрыва торфяной пыли, принимается равным по объему 16 %. Поэтому при сушке торфа топочными газами, содержащими в своем составе не более 16 % по объему свободного кислорода, полностью исключаются взрывоопасные условия работы сушильной установки. Для обеспечения такого режима работы целесообразно производить сушку высокотемпературными топочными газами без разбавления их воздухом.

В сушильных установках, предназначенных для сушки других материалов, содержание кислорода в газовых потоках следующее: лигнин и сланцы  $\leq 16 \%$ , бурые угли и полукоксы этих углей и каменных углей с выходом летучих веществ более 35 %  $\leq 18 \%$ , каменные угли с выходом летучих веществ менее 35 % и полукоксы этих углей  $\leq 19 \%$ . При сушке антрацита и полуантрацита содержание кислорода в сушильном агенте не ограничивается.

Содержание углекислого газа и водяных паров в пылегазовой смеси может служить надежным средством для предупреждения взрыва. Для торфяной пыли нижшим пределом влагосодержания, при котором взрыва не происходит, является влагосодержание 280 г/кг сухого воздуха.

Наряду с парообразной влагой на снижение вероятности и интенсивности взрыва влияет присутствие в сушильном агенте двуокиси углерода. В этом отношении положительную роль играют топочные (дымовые) газы, используемые в пневмогазовых сушилках. Представляя собой инертную среду, топочные газы способны обеспечивать взрывобезопасную работу сушильной установки. Для этого необходимо, чтобы содержание двуокиси углерода в газовом потоке составляло не менее 4,5 %.

Исследования по взрыву различной пыли позволяют установить значения отдельных параметров, обеспечивающих взрывобезопасную работу установок для сушки торфа. Взрыва торфяной пыли не происходит при отсутствии источника воспламенения; влажности торфа, превышающей 25 %; крупности частиц пыли более 0,15 мм; концентрации пыли, не превышающей 0,02 кг/м<sup>3</sup> газа; содержании свободного кислорода не более 16 %; влагосодержании аэрозвеси не менее 280 г/кг сухих газов и применении высокотемпературных неразбавленных топочных газов.

При проектировании сушильных установок для взрывоопасных материалов необходимо предусмотреть различные мероприятия по предупреждению пожаров и взрывов таких материалов, особенно их пылевой составляющей.

Важным мероприятием такого рода является обеспечение сушильно-топочных установок контрольно-измерительными приборами, регистрирующими температурный режим, состав топочных газов, содержание кислорода в парогазовой смеси.

Для предупреждения отложений и возможного взрыва пыли внутренние стены помещения рекомендуется делать гладкими, покрашенными в светлые тона или облицованными кафельными плитками. Подоконники выполняются с углом наклона к горизонту не менее 60°. Места, на которых может оседать пыль, должны быть легко доступными для чистки.

Бункера для исходного и высушенного материала делают обычно металлическими или железобетонными с гладкой внутренней поверхностью. Для полного опорожнения самотеком угол наклона стенок к горизонту принимается не менее 60°. Углы между стенками бункера должны быть плавно закруглены. Внутри бункеров не допускаются какие-либо выступы, на которых может оседать и задерживаться материал.

Выделение высушенного материала в системе пылеулавливания следует производить в аппаратах сухой очистки газов в две стадии. Для доведения до санитарных норм запыленности газов, выбрасываемых в атмосферу, необходимо устанавливать мокрые пылеуловители и электрофильтры.

Разгрузочные камеры и пылеулавливающие аппараты сухой очистки газов сушильных установок должны оборудоваться устройствами, препятствующими проникновению взрывных газов в помещение (барабанно-лопастные питатели, шлюзовые затворы, мигалки с принудительным открыванием клапанов и др.).

Дымососы сушильных установок следует размещать после аппаратов сухого пылеулавливания до устройств с мокрой очисткой газов.

В целях пожаротушения должен быть предусмотрен подвод водяного пара или инертных газов в сушильный аппарат, во все ступени пылеулавливания сухой очистки газов, в бункера высушенного материала. В пневмогазовых сушилках нашли применение устройства впрыска воды, которые срабатывают при повышении температуры газового потока сверх допустимой. Поступление воды

в сушильный объем и образование водяного пара повышает влагосодержание газов выше нормативного предела и делает среду взрывобезопасной.

Защита оборудования сушильной установки от разрушений при взрывах может быть осуществлена двумя способами: изготовлением элементов установки, рассчитанных на максимальное давление, возникающее при взрыве в закрытом объеме; устройством предохранительных клапанов, через отверстия которых удаляются газообразные продукты, образующиеся во время взрыва.

Первый способ связан со значительными материальными и денежными затратами. Правилами взрывобезопасности сушильных установок предусматривается защита оборудования от взрывов угольной, торфяной и другой пыли при помощи предохранительных клапанов. В этом случае газопроводы, шахты, трубы-сушилки и короба сушильных установок рассчитываются на внутреннее давление 0,04 МПа.

Суммарная площадь сечения всех предохранительных клапанов при расчетном внутреннем давлении 0,04 МПа принимается не менее 0,04 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> объема. Общая площадь сечения клапана сепаратора (циклона) выбирается из расчета не менее 0,025 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> его объема. На бункерах высушенного материала площадь сечения клапанов принимается из расчета 0,0025 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> объема бункера, но не менее 0,5 м<sup>2</sup>. На газосоудах, а также соединительных трубопроводах площадь сечения каждого клапана должна составлять не менее 70 % поперечного сечения.

Предохранительные клапаны имеют различное конструктивное исполнение: горизонтальные, наклонные, с обратным клапаном, в виде подвижного диска.

Диафрагмы предохранительных клапанов выполняют легкоразрывными из мягкой жести толщиной до 0,5 мм, диаметром не более 1 м с одинарным швом посередине. В случае изготовления диафрагмы из алюминиевого листа его толщина выбирается от 0,5 до 1 мм с подрезом по средней линии на 50 % толщины или используется асбестовый картон толщиной 3-5 мм. С внутренней стороны клапаны должны иметь поддерживающую решетку или сетку, выдерживающую нагрузку не менее 1000 Н.

Для защиты зданий от возможных разрушений в результате взрыва рекомендуется иметь достаточное остекление окон: одинарное остекление не менее 30 % поверхности одной из наибольших наружных стен помещения сушильного цеха с использованием металлических оконных переплетов.

Соблюдение мер по охране труда и правил взрыво- и пожаробезопасности может полностью устранить загорания и взрывы при эксплуатации сушильных установок.

## Литература

1. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена. – М.: Высшая школа, 1974. – 328 с.
2. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.Л. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.
3. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдман А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.
5. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.
6. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 218 с.
7. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник / Под ред. В.В. Красникова. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
8. Наумович В.М. Искусственная сушка торфа. – М.: Недра, 1984. – 222 с.
9. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
10. Филиппов В.А. Конструкция, расчет и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. – М.: Недра, 1979. – 309.



## Содержание

Введение	3
1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ УДАЛЕНИЯ ВЛАГИ ИЗ ГОРНЫХ ПОРОД	6
1.1. Сушка материалов. Способы сушки.	6
1.2. Энергия и формы связи воды в дисперсных системах	7
1.3. Процессы обезвоживания в технологии переработки различных горных пород	9
2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ ГОРНЫХ ПОРОД	12
2.1. Теплопроводность	13
2.2. Конвекция. Критерии подобия	17
2.2.1. Основы теории подобия и размерностей.	18
2.2.2. Теплоотдача при свободной конвекции	23
2.2.3. Теплоотдача при вынужденной конвекции	24
2.3. Теплообмен излучением	25
2.4. Сложный теплообмен	29
3. ПЕРЕНОС ТЕПЛОТЫ И ВЛАГИ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ	31
4. ТЕРМОДИНАМИКА ВЛАЖНОГО ГАЗА	36
4.1. Состав влажного газа	36
4.2. Характеристическое уравнение Клапейрона-Менделеева	37
4.3. Содержание водяного пара в газовой смеси. Точка росы	38
4.4. Плотность парогазовой смеси.	43
4.5. Энтальпия и теплоемкость влажного газа	44
5. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	48
5.1. Теплофизическая схема сушильного процесса	48
5.2. Материальный баланс сушилки	49
5.3. Баланс влаги и расход сушильного агента	50
5.4. Тепловой баланс	52
5.4.1. Уравнение теплового баланса теоретической сушилки	52
5.4.2. Затраты теплоты в действительной сушилке	55
5.4.3. Уравнение теплового баланса действительной сушилки	59
6. ТЕПЛОТОВОЙ РАСЧЕТ СУШИЛОК С ПОМОЩЬЮ <i>Id</i> -ДИАГРАММЫ	62
6.1. Построение <i>Id</i> -диаграммы	62
6.2. Использование <i>Id</i> -диаграммы для построения теоретического процесса сушки	65
6.3. Основные уравнения и построение действительного процесса сушки на <i>Id</i> -диаграмме для сушилки с однократным использованием сушильного агента	66

6.4. Сушилки с внутренним подогревом и замкнутой циркуляцией воздуха	70
6.5. Сушилки с рециркуляцией	73
6.6. Сушилки с промежуточным подогревом	74
7. СУШКА МАТЕРИАЛОВ ДЫМОВЫМИ (ТОПОЧНЫМИ) ГАЗАМИ	76
7.1. Элементный состав топлива. Теплота сгорания	76
7.2. <i>Id</i> -диаграмма для дымовых (топочных газов)	80
8. КЛАССИФИКАЦИЯ И УСТРОЙСТВО СУШИЛОК	84
8.1. Конвективные сушилки с неподвижным или движущимся слоем материала	85
8.1.1. Камерные сушилки	85
8.1.2. Туннельные сушилки	86
8.1.3. Ленточные сушилки	87
8.2. Конвективные сушилки с перемешиванием слоя материала	88
8.3. Конвективные сушилки со взвешенным слоем материала	91
8.3.1. Сушилки с кипящим (псевдоожженным) слоем	91
8.3.2. Распылительные сушилки	92
8.4. Конвективные сушилки с пневмотранспортом материала	94
8.4.1. Пневматические сушилки	94
8.4.2. Шахтно-мельничные сушилки	97
8.4.3. Расчет диаметра и длины трубы-сушилки	98
8.5. Контактные сушилки	100
8.5.1. Вакуум-сушильные шкафы	100
8.5.2. Вальцовые сушилки	101
8.6. Специальные виды сушки и типы сушилок	102
8.6.1. Терморadiационные сушилки	102
8.6.2. Сушка в электрическом поле высокой частоты	102
8.6.3. Сублимационные сушилки	103
9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК	104
9.1. Аппараты газоочистки	104
9.2. Циклоны	106
9.3. Мокрые пылеуловители	110
9.4. Электрофильтры	111
9.5. Вентиляторы сушильных установок	112
9.6. Характеристики насосов и вентиляторов. Рабочая точка	114
10. РАСЧЕТ СУШИЛОК	116
10.1. Расчет барабанной паровой трубчатой сушилки	116
10.1.1. Конструкция и принцип действия	116
10.1.2. Пример расчета	118

10.1.3. Проверочный тепловой баланс сушилки	123
10.1.4. Процесс сушки на $Id$ -диаграмме для паровой трубчатой сушилки	123
10.2. Расчет пневмогазовой сушилки	126
10.2.1. Конструкция и принцип действия трубы-сушилки	126
10.2.2. Пример расчета	127
10.3. Расчет индукционной сушилки с использованием тока промышленной частоты	134
10.3.1. Принцип действия	134
10.3.2. Расчет параметров индукционной установки	136
10.3.3. Пример расчета количества витков и сечения провода индуктора	144
11. УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК	147
Л и т е р а т у р а	154
П р и л о ж е н и я	
Приложение 1	
Приложение 2	

Учебное издание

БОГАТОВ Борис Александрович  
КУПТЕЛЬ Георгий Александрович  
ЯЦКОВЕЦ Аркадий Иосифович

## ИСКУССТВЕННАЯ СУШКА ГОРНЫХ ПОРОД

Редактор Е.И.Кортель. Корректор М.П.Антонова  
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

---

Подписано в печать 28.06.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 7,3. Тираж 300. Заказ 437.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
Лицензия № 02330/0056957 от 01.04.2004.  
220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.