

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГАОУ ВО «КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ)
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)**

РАСЧЕТ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

**Учебно-методическое пособие по курсовому и дипломному
проектированию для студентов по направлениям подготовки
бакалавров:**

**15.03.02 – Технологические машины и оборудование
(Машины и аппараты пищевых производств)
13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника
(Промышленная теплоэнергетика)**

**Набережные Челны
2019**

УДК 664.8.047

Печатается по рекомендации
учебно-методического совета
Автомобильного отделения НЧИ КФУ

Рецензент: докт. техн. наук, профессор И.Х.Исрафилов

Талипова И.П., Арсланов И.М. Расчет сушильных установок. Учебно-методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию для студентов по направлениям подготовки бакалавров: 15.03.02 – Технологические машины и оборудование (Машины и аппараты пищевых производств), 13.03.01 - Теплоэнергетика и теплотехника (Промышленная теплоэнергетика) / Под ред. И.П.Талиповой. – Набережные Челны: Изд.-полиграфич.центр НЧИ КФУ, 2019. – 69 с.

В учебно-методическом пособии приведены сведения о методике расчета сушильных установок, правила оформления текстовых и графических документов в соответствии со стандартами ЕСКД.

© Набережночелнинский институт К(П)ФУ, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА	4
2 ТЕОРИЯ СУШКИ.....	8
2.1 ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ГАЗА.....	8
2.2 РАВНОВЕСИЕ ФАЗ ПРИ СУШКЕ.....	11
2.3 ДИАГРАММА ЭНТАЛЬПИЯ - ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ВОЗДУХА $J - x$	14
2.4 ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ НА $J - x$ ДИАГРАММЕ	16
3 РАСЧЕТ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК.....	18
3.1 МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	18
3.2 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	19
3.3 РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ.....	22
3.4 РАСЧЕТ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК.....	24
4 РАСЧЕТ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК.....	33
4.1 РАСЧЕТ КАЛОРИФЕРОВ.....	33
4.2 РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ВЫБОР ВЕНТИЛЯТОРА ДЛЯ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.....	39
4.3 РАСЧЕТ ЦИКЛОНА ТИПА ВТИ.....	42
5 КОНСТРУКЦИИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК.....	44
СПИСОК ИТЕРАТУРЫ.....	65
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Курсовой проект по процессам и аппаратам пищевых производств является завершающим этапом работы студентов над курсом и по существу их первой и большой самостоятельной инженерной работой. Курсовой проект включает расчет типовой установки (выпарной, тепловой, сушильной и др.) и её графическое оформление. В период работы над проектом студент знакомится с действующими ГОСТами, ОСТами, нормами, справочной литературой, приобретает навыки выбора аппаратуры и технико – экономических обоснований, оформления технической документации.

1. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект по процессам и аппаратам пищевых производств состоит из пояснительной записки и графической части. Ниже приведены содержание и объем курсового проекта, порядок оформления технической документации, требование при защите проекта.

Содержание пояснительной записки. В пояснительную записку к курсовому проекту следует включать все исходные, расчетные и графические (вспомогательные) материалы и оформлять её в определенной последовательности:

1. Титульный лист.
2. Задание на проектирование.
3. Оглавление (содержание).
4. Введение.
5. Технологическая схема установки и её описание.
6. Технологический расчет аппаратов.
7. Расчет или подбор вспомогательного оборудования.
8. Заключение (Выводы и предложения).
9. Список использованной литературы.

Оформление пояснительной записки

Пояснительную записку оформляют в соответствии с ГОСТ 2.106-96. Лицевую часть обложки расчетно-пояснительной записки оформляют как титульный лист. На всех листах расчетно-

пояснительной записки выполняется основная надпись для текстовых конструкторских документов по ГОСТ 2.104.-90 (рис.1.1): на первых листах всех разделов – рисунок 1.2, на последующих листах – рисунок 1.3.

В начале пояснительной записки приводят оглавление, содержащее перечень этапов расчета.

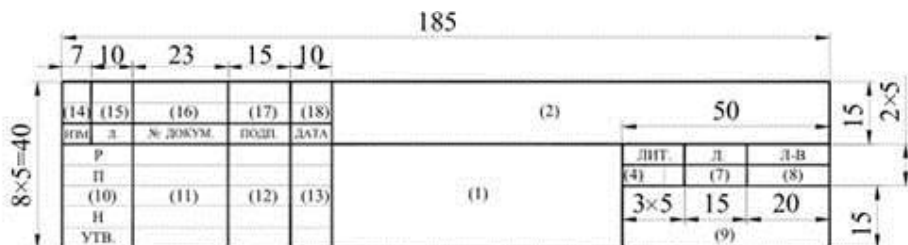


Рисунок 1.1 - Основная надпись для текстовых конструкторских документов (первый лист раздела и лист содержания)



Рисунок 1.2 – образец оформление листа содержания

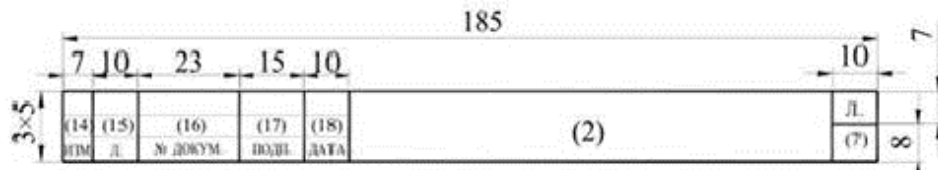


Рисунок 1.3 - основная надпись текстовых конструкторских документов (последующие листы)

Введение

В этом разделе необходимо кратко описать сущность и назначение данного процесса, сравнительную характеристику аппаратов для его осуществления и обосновать выбор конструкции основного аппарата. Необходимо также указать роль и место в народном хозяйстве отрасли – потребителя продукта, получение которого обусловлено заданием на проектирование.

Технологическая схема установки. Приводится принципиальная схема установки и ее описание с указанием позиций (номеров аппаратов). На схеме проставляются стрелки, указывающие направление всех потоков, значения их расходов, температур и других параметров.

Выбор конструкционного материала аппаратов. В этом разделе проекта необходимо привести данные по обоснованию выбора материала, из которого будет изготавливаться аппаратура, входящая в технологическую схему установки, с учетом скорости коррозии материала в данной среде, его механических и теплофизических свойств.

Технологический расчет аппаратов. Задачей этого раздела проекта является расчет основных размеров аппаратов (диаметра, высоты, поверхности теплопередачи и т. д.). Для проведения технологического расчета необходимо предварительно найти по справочникам физико – химические свойства перерабатываемых веществ (плотность, вязкость и т.п.), составить материальные и тепловые балансы. Затем на основе анализа литературных данных и рекомендаций данного пособия выбирается методика расчета размеров аппаратов. При этом особое внимание следует уделять гидродинамическому режиму работы того или иного аппарата, выбор которого должен быть обоснован с учетом технико – экономических показателей его работы. В этот же раздел входит гидравлический расчет аппаратов, целью которого является определение гидравлического сопротивления. В этом же разделе рассчитывается толщина тепловой изоляции аппаратов.

Заключение (выводы и предложения). Заканчивая расчетную часть проекта, студент должен дать анализ полученным результатам, их соответствия заданию на проект, высказать соображения о возможных путях совершенствования данного процесса и его аппаратурного оформления.

Список использованной литературы. Литературные источники, которые использовались при составлении пояснительной записки, которые использовались при составлении пояснительной записки, располагаются в порядке упоминания их в тексте или по алфавиту (по фамилии первого автора работы). Сведения о книгах должны включать: фамилию и инициалы автора, название книги, место издания, издательство, год издания, число страниц. Например: Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М., Химия, 1973.-752 с.

Оформление пояснительной записки.

Текст следует располагать на одной стороне листа. Записку разбивают на разделы и пункты, которые нумеруют арабскими цифрами (1.; 1.1.; и т.д.). Наименование разделов и пунктов записывают в виде заголовков. Каждый расчет раздела или пункта также должен содержать заголовок, указывающий рассчитываемый параметр.

Запись расчетов должна состоять из формулы, численных значений параметров, в нее входящих, результата и его размерности. Ниже дают расшифровку параметров, входящих в формулу, с указанием литературного источника и номера страницы.

Выполняемые расчеты сопровождают:

а) кратким обоснованием типа принятой конструкции тех или иных элементов в зависимости от их назначения и условий работы в механизме;

б) обоснованием выбора размеров, которые не определяют расчетом, а назначают по рекомендациям учебной или справочной литературы, по конструктивным или технологическим соображениям;

в) ссылками на литературу с указанием номером формул, диаграмм и таблиц. Ссылки на литературные источники записываются в квадратных скобках: первое число обозначает порядковый номер источника в списке используемой литературы; второе - страницу в этом источнике, на которой приведена формула или цитируемый материал, например [1, с.25].

После всех расчетов в пояснительной записке приводят полный список использованной литературы, в который заносят только те источники, на которые в тексте записки имеются ссылки, причем в список включают только печатные работы.

2 ТЕОРИЯ СУШКИ

Сушкой называется процесс удаления влаги из веществ (обычно твердых тел) путем ее испарения и отвода образующихся паров. Часто тепловой сушке предшествуют механические способы удаления влаги (отстаивание, фильтрование, центрифугирование и др.).

Во всех случаях при сушке в виде пара удаляется легколетучий компонент (вода, органический растворитель и т. д.). Этот процесс применяется обычно или на конечной стадии технологического процесса с целью обеспечения высоких физико-механических характеристик получаемых продуктов, или на промежуточных стадиях, если удаление растворителя необходимо по технологическим соображениям.

По способу подвода теплоты различают:

конвективную сушку, проводимую путем непосредственного контакта материала и сушильного агента. Подвод теплоты осуществляется газовой фазой (воздух или смесь воздуха с продуктами сгорания топлива), которая в процессе сушки охлаждается с увеличением своего влагосодержания;

контактную (кондуктивную) сушку, которая реализуется путем передачи теплоты от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;

радиационную сушку - путем передачи теплоты инфракрасным излучением;

сублимационную сушку, при которой влага удаляется из материала в замороженном состоянии (обычно в вакууме);

диэлектрическую сушку, при которой материал высушивается в поле токов высокой частоты.

2.1 ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ГАЗА

Смесь сухого газа с парами жидкости называется влажным газом. Влажный газ характеризуют следующие параметры: температура; давление; плотность; относительная и абсолютная влажность; влагосодержание; теплоемкость; энтальпия.

Влажный воздух, который наиболее часто используют в качестве сушильного агента, можно считать при небольших давлениях и положительных температурах бинарной смесью идеальных газов: сухого

воздуха и водяного пара. В соответствии с законом Дальтона давление идеальной газовой смеси является суммой парциальных давлений ее компонентов:

$$P = p_{c.g} + p_{в.п},$$

где P - давление, при котором находится парогазовая смесь, Па;
 $p_{c.g}, p_{в.п}$ - парциальные давления сухого газа и водяного пара соответственно, Па.

Пар называют свободным или перегретым при температуре t и давлении P , если он не конденсируется в этих условиях. Максимально возможное содержание пара в газе, выше которого наблюдается конденсация, соответствует условиям насыщения при определенной температуре t и парциальном давлении p_n .

Различают абсолютную, относительную влажности и влагосодержание влажного воздуха.

Абсолютная влажность - это масса водяного пара в единице объема влажного воздуха. Поскольку пар как компонент бинарной газовой смеси занимает весь объем влажного газа, понятие абсолютной влажности совпадает с понятием плотности пара ρ_n (в кг/м³) при температуре t и парциальном давлении p_n .

Относительная влажность (φ) - это отношение количества паров жидкости в газе к максимально возможному при данных температуре и общем давлении или (что то же) отношение плотности пара ρ_n при данных условиях к плотности насыщенного пара $\rho_{н.п}$ при тех же условиях:

$$\varphi = \rho_n / \rho_{н.п}.$$

Под *влагосодержанием* x понимают количество пара жидкости (в кг), приходящегося на 1 кг абсолютно сухого газа:

$$x = G_m / L,$$

где G_m - масса (массовый расход) пара, кг (кг/с);

L - масса (массовый расход) абсолютно сухого газа, кг/ (кг/с).

Для системы водяной пар-воздух существует уравнение для определения влагосодержания, рассчитанное по формуле состояния идеального газа (при $M_n = 18$ кг/моль и $M_{c.g} = 29$ кг/моль) :

$$x = \frac{18}{29} \varphi p_{n,n} / (P - \varphi p_{n,n}) = 0,622 \varphi p_{n,n} / (P - \varphi p_{n,n}).$$

Удельная теплоемкость влажного газа принимается аддитивной величиной теплоемкостей сухого газа и пара. При этом различают удельную теплоемкость $C_{см}$, отнесенную к 1 кг парогазовой смеси:

$$C_{см} = (C_{c,z} + C_n x) / (1 + x),$$

и удельную теплоемкость влажного газа c , отнесенную к 1 кг сухого воздуха (эту величину обычно используют при расчетах):

$$c = C_{c,z} + C_n x.$$

где c - удельная теплоемкость сухого газа, Дж/(кгК);

C_n - удельная теплоемкость пара, Дж/(кгК).

Удельную энтальпию (J) парогазовой смеси (в Дж/кг) выражают также по правилу аддитивности как сумму удельных энтальпий сухого газа $J_{c,z}$ и пара J_n :

$$J = J_{c,z} + J_n x.$$

Преобразуем это уравнение:

$$J = C_{c,z} t + (r_0 + C_n t)x,$$

где r_0 - удельная теплота преобразования при 0°C ;

t - температура свободного (перегретого) пара, $^\circ\text{C}$.

При расчетах сушильных устройств требуется знать объемные значения потоков V при соответствующих параметрах парогазовой смеси, которые определяют из выражения

$$V = L (1 + x) / \rho_{см}.$$

При этом плотность парогазовой смеси $\rho_{см}$ можно представить как сумму концентраций (плотностей) сухого газа и пара жидкости, находящихся в данном объеме (при условии его постоянства):

$$\rho_{см} = \rho_n + \rho_{c,z}.$$

С учетом уравнения состояния идеального газа имеем:

$$\rho_{см} = (P/RT)(1 + x) / [(1/M_{c,z}) + (x/M_n)].$$

Данная формула удобна для расчетов плотности парогазовой

смеси. Согласно этому выражению, при постоянстве общего давления плотность смеси уменьшается при увеличении температуры и влагосодержания.

Отметим, что давление насыщенного пара при атмосферном давлении P парогазовой смеси зависит только от температуры и находится по таблицам равновесия пар-жидкость.

2.2 РАВНОВЕСИЕ ФАЗ ПРИ СУШКЕ

Рассмотрим влажное твердое тело, находящееся в контакте с газовым потоком. При постоянном давлении и определенной температуре влажный газ характеризуется величиной относительной влажности:

$$\varphi = \rho_n / \rho_{n,n} = p_n / p_{n,n}.$$

Если давление пара жидкости в материале p_m отличается от парциального давления пара в газовом потоке p_n , то между двумя фазами будет происходить массообмен вплоть до состояния равновесия, которое возникает при $p_m = p_n$. При этом наступает состояние динамического равновесия, которому соответствует предельная влажность материала, называемая *равновесной влажностью* W_p^0 .

Направление массопереноса определяется абсолютными значениями величин p_m и p_n . Если $p_n > p_m$, перенос влаги осуществляется из газа к твердому телу, т.е. происходит процесс сорбции (увлажнения). В противоположном случае, когда $p_n < p_m$, перенос влаги осуществляется из твердой фазы в газовую, т.е. идет процесс десорбции (сушки).

Когда давление пара жидкости в материале p_m становится равным парциальному давлению пара в газовой фазе p_n , массообмен прекращается и достигается состояние динамического равновесия. При этом в условиях постоянных давления и температуры каждому значению относительной влажности φ соответствует определенная величина влагосодержания (равновесного) W_p^0 материала. Имея совокупность величин $\varphi(W^0)$, можно

построить изотерму, которая будет характеризовать данное влажное тело (изотерма сорбции - рисунок 2.1).

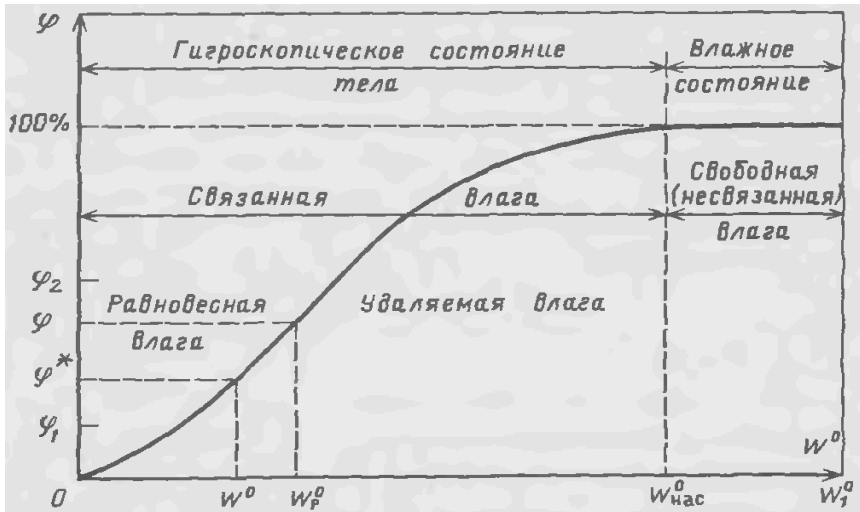


Рисунок 2.1- Диаграмма состояния влажного материала

Например (по рисунку 2.1), влагосодержанию материала W^0 соответствует равновесная относительная влажность φ^* , и если $\varphi_1 < \varphi^*$ - последует десорбция (сушка материала);

$\varphi_2 > \varphi^*$ - будет сорбция (увлажнение материала).

Пусть $W_{нас}^0$ - влагосодержание материала, соответствующее равновесному состоянию с газом, относительная влажность которого $\varphi = 100\%$. Если тело с влагосодержанием $W_1^0 > W_{нас}^0$ находится в контакте с газом относительной влажности φ , процесс сушки будет происходить до тех пор, пока влагосодержание материала достигнет величины W_p^0 , которая соответствует данной влажности φ . Более продолжительный контакт влажного тела с данной газовой средой не приведет ни к каким дополнительным изменениям.

Разность влагосодержаний ($w_1^0 - w_p^0$) представляет собой относительное количество влаги, которое может быть удалено при относительной влажности газовой фазы φ .

Когда влагосодержание твердого тела ниже $w_{нас}^0$, давление паров жидкости в материале меньше парциального давления пара чистой жидкости. Влага, соответствующая такому влагосодержанию, называется *связанной*.

Если влагосодержание материала превышает величину $w_{нас}^0$, давление паров жидкости в материале такое же, как и парциальное давление пара чистой жидкости. Поэтому влагу, соответствующую разности влагосодержаний $w_1^0 - w_{нас}^0$, принято называть *несвязанной (свободной)*.

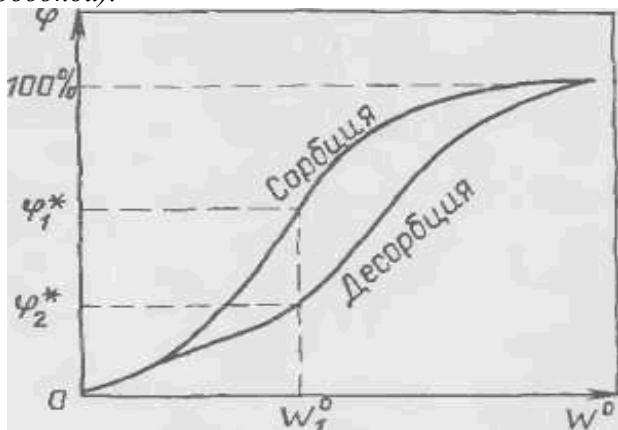


Рисунок 2.2 - Изотермы сорбции и десорбции

Отметим, что величину $w_{нас}^0$ называют максимальным гигроскопическим влагосодержанием (влажностью).

Таким образом, можно выделить две области состояния влажного материала:

1) *область влажного состояния (влажная зона)*, когда давление паров жидкости в материале не зависит от влажности материала и равно давлению насыщения свободной жидкости при температуре материала ($w_1^0 - w_{нас}^0$);

2) область гигроскопического состояния (зона связанной влаги), когда давление пара жидкости над поверхностью материала отличается от давления насыщенного пара свободной жидкости и зависит от его влажности и температуры ($W^0 - W_{нас}^0$).

На практике деление на зоны оказывается условным, так как часто при среднем значении влагосодержания, превышающем $W_{нас}^0$, влагосодержание на поверхности материала может быть близким к равновесному.

Следует отметить наличие на диаграмме $\varphi = f(W^0)$ изотерм десорбции (рисунок 2.2). Причем для кривых сорбция - десорбция характерно явление гистерезиса, указывающее на то, что для достижения одного и того же равновесного влагосодержания относительная влажность газа при увлажнении материала должна быть больше, чем при его сушке.

2.3 ДИАГРАММА ЭНТАЛЬПИЯ – ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ВОЗДУХА J – x

В большинстве технологических процессов тепловой сушки в качестве сушильного агента используют воздух или смесь воздуха с продуктами сгорания топлива. Для определения параметров влажного воздуха, изменяющихся в процессе сушки, может быть использована диаграмма Л. К. Рамзина (рис.2.3), на которой в координатах энтальпия (J) - влагосодержание (x) нанесены линии постоянной относительной влажности ($\varphi = \text{const}$), изотермы ($t = \text{const}$) и линия зависимости парциального давления водяного пара от влагосодержания воздуха. Диаграмма построена для среднегодового давления центральных районов России ($P = 100$ кПа). Чтобы обеспечить корректное выполнение линий $\varphi = \text{const}$ (не допустить их слияния), угол между осями координат составляет 135° , т.е. линии постоянной энтальпии наклонены под таким углом к оси влагосодержаний.

Изменение параметров влажного воздуха можно описать следующим уравнением:

$$(J_2 - J_1)/(x_2 - x_1) = c_{жс} t_m .$$

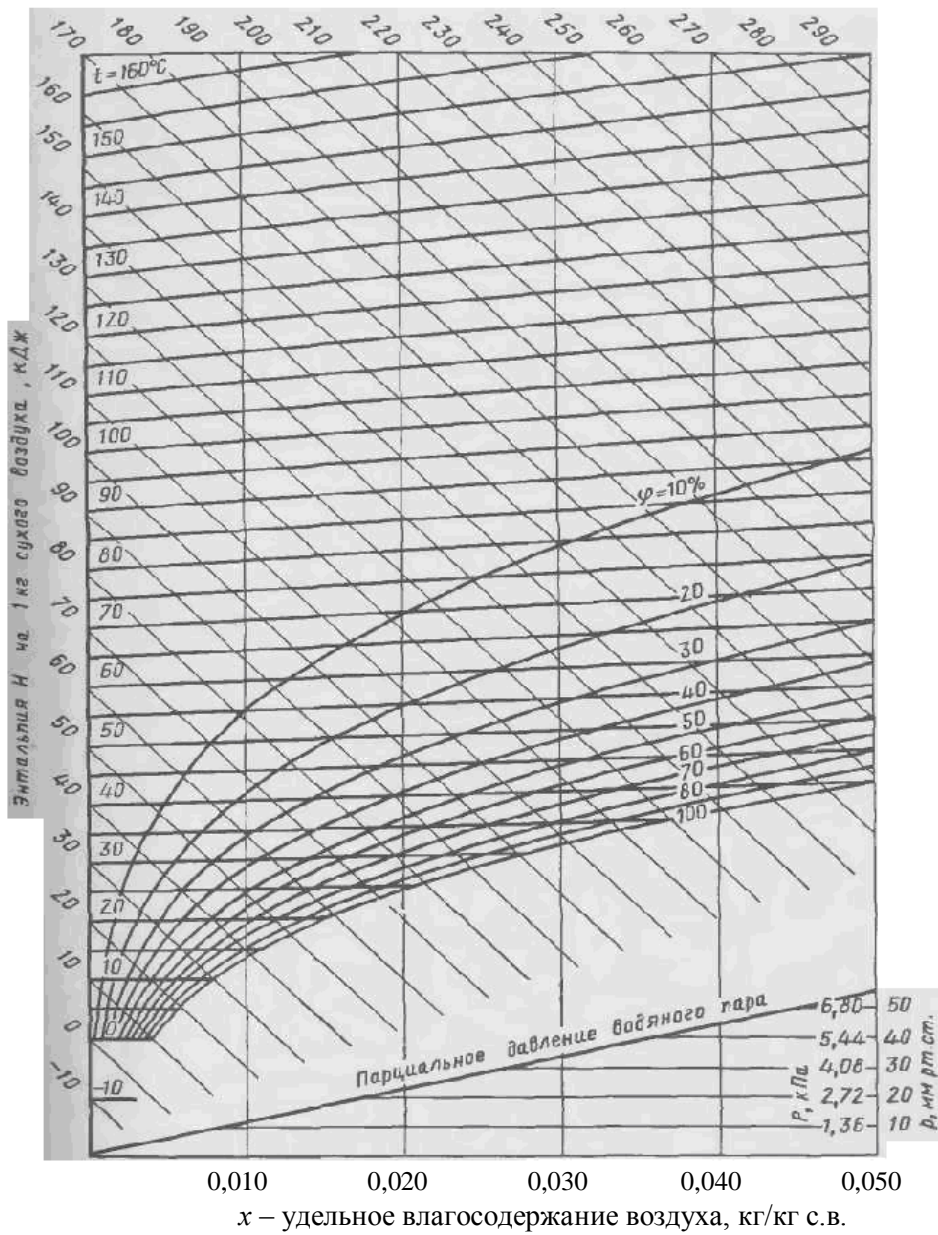


Рисунок 2.3 - J – x диаграмма Рамзина

2.4 ПОСТРОЕНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ НА J - x ДИАГРАММЕ

На диаграмме J - x можно показать, каким образом будут изменяться параметры сушильного агента (воздуха или дымовых газов) при его последовательном прохождении через калорифер и сушильную камеру, а затем определить его расход и необходимое количество теплоты на сушку.

Нагрев воздуха в калорифере от исходных параметров (t_0, φ_0) или соответственно (x_0, J_0) до конечного состояния в калорифере или, что то же самое, до начального состояния в сушильной камере (t_1, J_1, x_1) характеризуется вертикальной линией AB (рисунок 2.4), так как влагосодержание газа в калорифере не меняется $(x_0 = x_1)$.

Во время сушки переменными являются все параметры, характеризующие состояние газа. В частности, изменение энтальпии и влагосодержания описывается уравнением:

$$(J_2 - J_1)/(x_2 - x_0) = (J_2 - J_1)/(x_2 - x_1) = \Delta,$$

которое в более общем виде можно записать так:

$$(J - J_1)/(x - x_0) = \Delta.$$

Очевидно, что это линейное уравнение, в котором величина Δ , часто называемая *внутренним балансом сушильной камеры*, представляет собой наклон линии сушки.

В зависимости от Δ линия реального сушильного процесса может занять одно из трех возможных положений (BC при $\Delta = 0$, BC_1 при $\Delta > 0$ и BC_2 при $\Delta < 0$).

Сушка при $\Delta = 0$ (т. е. при постоянной энтальпии воздуха $H_2 = H_1$) возможна в двух случаях:

1) при так называемой *теоретической сушке*, когда процесс является адиабатическим, т. е. $q_M = 0, q_T = 0, q_n = 0, q_{доп} = 0$ и $\theta_1 = 0$;

2) при протекании реального процесса, когда удельные расходы теплоты на нагрев высушенного материала (q_M), транспортных устройств (q_T) и удельные потери теплоты (q_n) компенсируются подводом дополнительной теплоты ($q_{доп}$) и произведением $c_e \theta_1$:

$$c_e \theta_1 + q_{доп} = q_M + q_T + q_n.$$

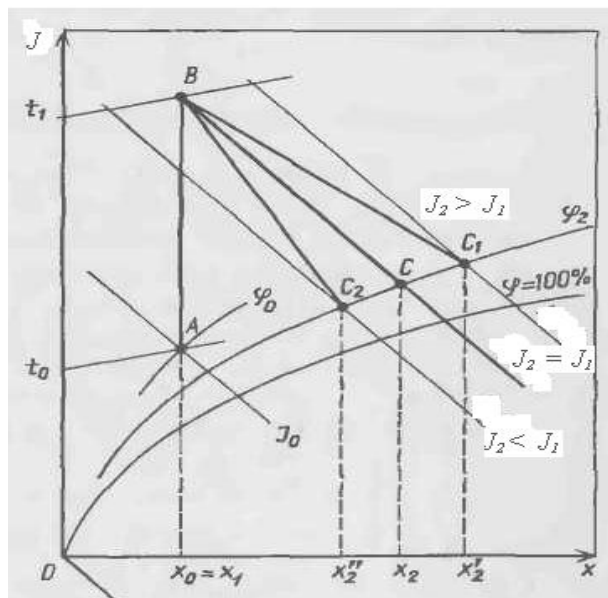


Рисунок 2.4 - Изменение параметров сушильного агента по диаграмме $J - x$ в процессе нагревания и сушки:
 AB – в калорифере; BC , BC_1 и BC_2 - в сушильной камере при $\Delta = 0$, $\Delta > 0$ и $\Delta < 0$ соответственно.

В условиях теоретической сушки влага из материала, находящегося при температуре $\theta_1=0$, испаряется за счет теплоты охлаждающегося газа, энтальпия которого остается постоянной в силу того, что убыль теплоты компенсируется энтальпией переходящих в газ паров влаги.

Определив величину Δ с помощью уравнения:

$$\Delta = (q_{дон} - c_g \theta_1) - (q_M + q_T + q),$$

можно построить линию реального сушильного процесса.

Задавшись произвольным значением J (или x), определяют величину конечного влагосодержания воздуха x_2 (или J_2) как значение, соответствующее точке пересечения линии с любым известным параметром влажного газа на выходе из сушильной камеры (t_2 , φ_2 и т.д.). При этом удельные расходы воздуха и теплоты на сушку определяют по известным уравнениям: $l = l/(x_2 - x_1)$, $q_k = l(J_2 - J_1)$.

3 РАСЧЕТ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Расчет сушильных аппаратов выполняют в такой последовательности:

1) по требуемой производительности составляют материальный баланс и определяют количество испаряемой влаги;

2) составляют тепловой баланс и находят требуемое количество теплоты, расход топлива, пара, сушильного агента и т.д.;

3) определяют необходимую поверхность тепло-и массообмена, обеспечивающую данную производительность сушилки;

4) по величине поверхности тепло- и массообмена находят габариты сушильной камеры и определяют необходимое число сушильных аппаратов;

3.1 МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Материальный баланс имеет целью определение количества (расхода) испаренной влаги и расхода сушильного агента. Его составляют для потоков высушиваемого материала и газа.

Обычно задается годовая производительность сушилки по готовому продукту. Тогда часовая производительность сушилки будет G_2 (в кг/ч):

$$G_2 = G/(ab),$$

где G - годовая производительность по готовому продукту, кг;

a - число часов работы сушилки в сутки; b - число рабочих дней в году; величины a и b зависят от характера производства; обычно для непрерывнодействующих производств принимают

$a = 22$ ч, $b = 330$ сут, иногда принимают 7000-8000 рабочих часов в году.

Если в процессе сушки происходят безвозвратные потери материала, часовую производительность рассчитывают с учетом этой поправки:

$$G'_2 = G_2/k,$$

где k - коэффициент, учитывающий выход продукта; он должен составлять 0,95...0,99.

Количество удаляемой влаги W (в кг/ч) определяют из уравнения материального баланса:

$$W = G_2 (w_1 - w_2) / (1 - w_1),$$

где w_1 и w_2 - начальная и конечная влажность материала, масс. доли.

Тогда производительность сушилки по исходному материалу составит (в кг/ч):

$$G_1 = G_2 + W.$$

В процессе сушки масса абсолютно сухого вещества (G_c) не изменяется, если нет уноса его частиц или других потерь, т.е. (в кг/ч):

$$G_c = G_1(I-w_1) = G_2(I-w_2),$$

откуда

$$G_1 = G_2(I-w_2)/(I-w_1).$$

При этом влагосодержания материала будут:

1) начальное

$$w^{\circ}_1 = w_1/(I-w_1);$$

2) конечное

$$w^{\circ}_2 = w_2/(I-w_2).$$

Расход абсолютно сухого газа определяют по уравнению:

$$L = W/(x_2 - x_1).$$

3.2 ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для испарения влаги и проведения совместно с сушкой других термических процессов к материалу необходимо подвести тепло. Его можно подводить различными способами в зависимости от способа сушки. Если на основании опытных данных известен режим процесса, то из теплового баланса можно определить расход тепла на сушку и расход соответственно топлива, электроэнергии, пара. Суммарный расход теплоты в сушилке:

$$\Sigma Q = Q_{исп} + Q_m + Q_n + Q_{\Gamma} + Q_D + Q_T,$$

где $Q_{исп}$, Q_m - теплоты соответственно на испарение влаги и нагревание материала;

Q_n и Q_{Γ} - потери теплоты соответственно в окружающую среду и с отходящими газами;

Q_D - расход теплоты на дегидратацию, разрушение энергии связи с материалом и другие эндотермические процессы;

Q_T - расход теплоты на нагревание дополнительно вводимых сред (пара, сжатого воздуха и транспортных средств).

Для непрерывнодействующих сушилок рассчитывают часовой расход теплоты, для сушилок периодического действия - расход теплоты на один цикл сушки. Расход теплоты (в кДж/ч) на испарение жидкости:

$$Q_{исп} = W (J_{II} - J_{Ж});$$

на ипарение воды:

$$Q_{исп} = 4,19W (595 + 0,49 t_{Г} - \theta_1),$$

где H_{II} -энтальпия перегретого пара жидкости при температуре отходящих газов;

$H_{Ж}$ -энтальпия жидкости при начальной температуре материала; $t_{Г}$ - температура отходящих газов, К;

θ_1 - начальная температура материала, К.

Расход теплоты на нагревание высушенного материала (в кДж/ч):

$$Q_M = G_2 c_M (\theta_2 - \theta_1).$$

где θ_2 -температура материала, уходящего из сушильной камеры, К;

c_M -теплоемкость высушенного материала, кДж/(кг К).

Причем:

$$c_M = c_C (1 - w_2) + w_2 c_{Ж},$$

где c_C - теплоемкость абсолютно сухого материала, кДж/(кг К); $c_{Ж}$ - теплоемкость испаряемой жидкости, кДж/(кг К).

Потери теплоты сушилкой в окружающую среду (в кДж/ч):

$$Q_n = KF_{n.c.} (\bar{t}_{cp} - t_0),$$

где K - коэффициент теплопередачи через стенку сушилки;

$F_{n.c.}$ - наружная поверхность сушилки;

\bar{t}_{cp} - средняя температура в сушилке, К;

t_0 - температура окружающей среды, К.

Теплоизоляцию сушилки подбирают с учетом того, чтобы температура наружной стенки не превышала 40-50 °С (313-323 К). До определения максимальной поверхности сушилки можно приблизительно принять удельные потери теплоты в окружающую среду $q_0 = 125 \div 420$ кДж на 1 кг испаренной влаги в зависимости от влажности материала

(меньшую величину принимают для высоковлажных материалов).

Потери теплоты с отходящими газами составят:

$$Q_{\Gamma} = L J_2,$$

где H_2 - энтальпия отходящих газов при температуре t_2 и влагосодержании x_2 .

При расчете сушилок часто приходится учитывать дополнительное количество воздуха $L_{\text{доп}}$, который поступает в сушилку через загрузочное отверстие и другие неплотности. Обычно принимают:

$$L_{\text{доп}} \approx 0,1 L.$$

Расход теплоты на дегидратацию и другие эндотермические процессы (в кДж/ч):

$$Q_{\text{д}} = \bar{q}_{\text{д}} G_2,$$

где $\bar{q}_{\text{д}}$ - средняя удельная теплота дегидратации, отнесенная к 1 кг готового (сухого) продукта.

Расчет количества теплоносителя

При конвективной сушке расход газообразного теплоносителя определяют из теплового баланса сушилки. Количество теплоты, поступающей в сушилку вместе с нагретым теплоносителем:

$$\Sigma Q = L J_1,$$

где J_1 - энтальпия газа, поступающего в сушилку.

С учетом уравнения (2.9) получим расход сушильного агента (в кг/ч):

$$L = (Q_{\text{исп}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{н}} + Q_{\text{д}} + Q_{\Gamma}) / (J_1 - J_2) = (\Sigma Q - Q_{\Gamma}) / (J_1 - J_2).$$

При этом влагосодержание воздуха после сушилки:

$$x_2 = x_1 + W(L + L_{\text{доп}}).$$

Средний объемный расход воздуха в сушилке (в м³/ч):

$$\bar{V} = (L + L_{\text{доп}})(1 + \bar{x}) / \bar{\rho}_g,$$

где x и ρ_g - соответственно влагосодержание и плотность газа при средней температуре $t = 1/2(t_1 + t_2)$.

Если для нагревания воздуха используют паровой калорифер, то расход пара в нем составит (в кг/ч):

$$D = L(H_1 - H_0) / [\eta(J_{\text{г.п.}} - J_{\text{ж}})],$$

где $H_{Г.П.}$, $H_{Ж}$ -соответственно энтальпия пара и конденсата;
 η - коэффициент полезного использования теплоты в калорифере.

При контактном подводе теплоты к высушиваемому материалу, например через тепловую рубашку аппарата от пара, расход последнего определяется из следующего соотношения (в кг/ч):

$$D = \Sigma Q / [\eta_p (J_{Г.П.} - J_{Ж})],$$

где η_p - коэффициент использования теплоты в рубашке сушильного аппарата.

3.3 РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЫ

Для определения габаритных размеров сушилки необходимо рассчитать поверхность материала, через которую происходит перенос теплоты и испарение влаги, или соответственно длительность сушки материала.

Для любой сушилки справедливо следующее соотношение:

$$\tau = F / F_{\text{ч}} \approx G_{\text{м}} / [0,5(G_1 + G_2)], \quad (2.22)$$

где τ - среднее интегральное время пребывания материала в зоне сушки, ч;

F - поверхность материала, находящегося в зоне сушки, через которую происходит тепло-и массообмен, м^2 ;

$F_{\text{ч}}$ - поверхность материала, проходящего через зону сушки в единицу времени, $\text{м}^2/\text{ч}$;

$G_{\text{м}}$ -количество материала, одновременно находящегося в зоне сушки (заполнение сушилки), кг.

Поверхность материала обусловлена его формой, методом сушки и транспортирования продукта через сушилку, способом подвода теплоты и т.д. Например, при кондуктивной сушке она равна рабочей поверхности обогреваемого вальца; при сушке инфракрасными лучами - поверхности облучения материала, при конвективном подводе теплоты - поверхности материала, омываемой сушильным агентом. Так, для материала в форме шарообразных частиц:

$$F_{\text{ч}} = 6 G_1 / (\rho_{\text{ч}} d_{\text{ср}}) ,$$

где ρ_c - плотность частиц, кг/м³;

d_{cp} -средний размер частиц полидисперсной системы, м.

А для листового материала с одной рабочей поверхностью:

$$F_c = G_1 / (h \rho_c), \quad (2.24)$$

где h - толщина листа, м.

Продолжительность сушки зависит от условий подвода теплоты к материалу и от миграции влаги и теплоты внутри тела. В одном случае доминирующим фактором является внешний тепло- и массообмен, в другом, наоборот, все зависит от интенсивности протекания процесса переноса теплоты и массы внутри тела, когда значительны градиенты температуры и влажности внутри материала. Для этих двух случаев следует рекомендовать различные методы инженерных расчетов сушильного аппарата.

3.4 РАСЧЕТ ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

В данном разделе будут приведены примеры расчетов некоторых сушильных установок, нашедших применение в пищевой промышленности.

Для сушки кусковых (штучных) продуктов (хлеб, сухари, нарезанные овощи, яблочные выжимки и т. п.) применяют туннельные установки с передвижными вагонетками, а также ленточные сушилки. Для грубодисперсных (зернистых) материалов (зерно злаковых культур и т. п.) используют рециркуляционные и рециркуляционно-изотермические сушилки, в которых одним из основных элементов является шахта с коробами, а также барабанные сушилки (жом и т. п.). Для тонкодисперсных (гранулированных) материалов (гранулы хлебопекарных дрожжей, желатин, вареные крупы и т. п.) перспективно широкое применение установок с виброкипящим слоем²; для порошковых материалов (никотиновая кислота, крахмал и т. п.) — установок с фонтанирующим слоем и пневмогазовых сушилок, для сушки жидких продуктов (экстракты, молоко и т. п.) — распылительных установок.

Расчет шахтной сушильной установки

Скорость агента сушки и воздуха в отводящих коробах V (м/с) не должна превышать 6,0 м/с во избежание уноса зерна из шахты. Для расчета числа коробов определяют площадь F (м²) поперечного сечения отводящих коробов (по зонам).

Для зон сушки F_c (м²) при общем расходе агента сушки $V_{\text{общ}}$ (м³/ч):

$$F_c = V_{\text{общ}} / 3600v.$$

Для зоны охлаждения при общем расходе холодного воздуха $V_{\text{хв}}$ (м³/ч) площадь поперечного сечения будет равна (м²):

$$F_{\text{охл}} = V_{\text{хв}} / 3600v.$$

Число отводящих коробов для каждой зоны z_0 определяется как:

$$z_0 = F / f,$$

где f — площадь сечения короба, м².

Производительность шахтной сушилки по испаренной влаге W (кг/ч) определяется по формуле:

$$W = G[(u_1 - u_2) / (100 - u_2)],$$

где G — пропускная способность зерносушилки по сырому зерну, кг/ч; u_1, u_2 — начальная и конечная влажность зерна в зоне сушки, %.

Массовый расход агента сушки L (кг/ч) рассчитывается в виде зависимости:

$$L = W / (d_2 - d_1),$$

где d_1, d_2 — влагосодержание теплоносителя на входе в шахту и на выходе из нее, кг/кг.

Число подводящих и отводящих коробов, установленных в сушильной шахте или шахте охлаждения, можно определить следующим образом:

$$z = L / 3600VF\rho,$$

где ρ — плотность агента сушки, кг/м³.

Коэффициент циркуляции рассчитывают в виде:

$$n = (u_1 - u_2) / \Delta u,$$

где Δu — снижение влажности за один цикл сушки, %.

Мощность электродвигателя N (кВт) для привода вентилятора определяется по формуле

$$N = 0,02 \cdot 10^{-5} K VP / (\eta_1 \eta_2 \eta_3).$$

где K — коэффициент запаса; V — расход воздуха, м³/ч; P — полное давление, Па; η_1 — КПД подшипников; η_2 — КПД ременной передачи; η_3 — КПД вентилятора.

Расчет ленточной сушильной установки

Масса высушенного продукта, выходящего из ленточной сушилки Π (кг/ч), рассчитывается по формуле

$$\Pi = G[(100 - u_1) / (100 - u_2)],$$

где G — пропускная способность по влажному продукту, кг/ч;
 u_1, u_2 начальная и конечная влажность продукта, %.

Массовый расход воздуха на сушку L (кг/ч) определяется как:

$$L = W l,$$

где W — количество испаренной влаги в зоне сушки, кг/ч;
 l — расход воздуха на испарение 1 кг влаги, кг/кг:

$$l = 1000 / (d_2 - d_1),$$

где d_2 и d_1 — влагосодержание воздуха на выходе и входе в сушильную камеру соответственно, г/кг.

Объем расходуемого воздуха V_v (м³/с) рассчитывается по формуле:

$$V_v = LV_{уд} [R(273 + t_0) / (0,1 + \varphi_0 P_n) 10^6],$$

где R — газовая постоянная, $V_{уд}$ — удельный объем воздуха, м³/кг; t_0 — температура наружного воздуха, °С; φ_0 — относительная влажность наружного воздуха, %; P_n — давление насыщенных паров при t_0 , Па.

Расход теплоты в воздухоподогревателе Q (Дж/ч) определяется как:

$$Q = Wq,$$

где q — удельный расход теплоты, отнесенный к 1 кг испаренной влаги, Дж/кг;

$$q = l(I_1 - I_0),$$

где I_1 и I_0 — энтальпия влажного воздуха до калорифера и после него (находят по I - d -диаграмме).

Площадь поверхности нагрева F_v (м^2) воздухоподогревателя равна:

$$F_v = Q / (k \Delta t),$$

где k — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$;

Δt — средняя логарифмическая разность температур, $^\circ\text{C}$.

Расход пара D ($\text{кг}/\text{с}$) на сушку рассчитывается по формуле:

$$D = Q / (i - i_k),$$

где i и i_k — энтальпия греющего пара и конденсата, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Площадь ленточной сушилки F_c (м^2):

$$F_c = \Pi / q_{\text{уд}},$$

где $q_{\text{уд}}$ — удельная производительность сушилки по сухому продукту, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Общая длина лент сушилки l_c (м):

$$l_c = F_c / b,$$

где b — ширина ленты, м .

Расчет барабанной сушильной установки

Уравнение, связывающее основные параметры работы аппарата с вращающимся барабаном, имеет вид:

$$G = (4 / 3) \pi n (\varphi + \psi \cos \beta) / \sin \beta (R^2 - r^2)^{3/2},$$

где G — объемная пропускная способность барабана, $\text{м}^3/\text{с}$;

n — частота вращения барабана, с^{-1} ; φ — угол наклона барабана, $\varphi = 5$ град; ψ — угол наклона слоя к оси барабана, рад; β — угол естественного откоса сыпучего продукта, рад; R — внутренний радиус барабана, м ; r — радиус, касающийся слоя материала, м .

Частота вращения барабана обычно не превышает 5...8 об/мин.

Рабочий объем барабана V_6 (м^3) рассчитывают по формуле:

$$V_6 = W / A,$$

где W — количество испаренной влаги, $\text{кг}/\text{ч}$;

A — напряжение объема барабана по испаренной влаге, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$;

$$V_6 = (\pi / 4) D_6^2 l_6,$$

где D_6 — диаметр барабана, м ; l_6 — длина барабана, м .

Задаем диаметр барабана $D_{бар}$, который рекомендуется выполнять диаметрами $D_{бар}=1000, 1200, (1400), 1600, (1800), (2000), 2200, 2500, 2800, 3000, 3200, 3500$ мм при максимальном отношении длины к диаметру $L_{бар}/D_{бар}=3,5...7$ и частоте вращения барабана $n=0,5\sim 8$ об/мин.

Значения A приведены в таблице 3.1.

Таблица 31 - напряжение барабана по влаге A в барабанных сушилках для некоторых пищевых продуктов

Материал	Влажность материала, %		Температура сушильного агента, °C		$A, \frac{кг\ вл.}{м^2\ ч}$	Особенности конструкции, тип насадки
	W_1	W_2	t_1	t_2		
Жом свекловичный	84	12	750	100-125	185	Распределительная
Зерно (пшеница)	20	14	150-200	50-80	20-30	Распределительная
Мезга кукурузная	68	12	300	100	40-50	Распределительная
Сахар-песок	3,0	0,15	100	40	8 - 9	Подъемно-лопастная
Соль поваренная	4 – 6	0,2	150-200	-	7	Подъемно-лопастная

Время пребывания сыпучего продукта τ (ч) в аппарате с вращающимся барабаном:

$$\tau = 2\xi\rho_n(u_1 - u_2) / \{A[200 - (u_1 - u_2)]\},$$

где ξ — коэффициент заполнения барабана продуктом;

ρ_n — насыпная плотность продукта, $кг/м^3$.

Объем продукта, находящегося в барабане, V_n ($м^3$):

$$V_n = \tau\Pi / 2\rho_n,$$

где Π — производительность барабанной сушилки по готовому продукту, кг/ч.

В общем случае время пребывания сыпучего продукта в барабане τ (с):

$$\tau = V_n / G;$$

тогда коэффициент заполнения барабана продуктом ξ рассчитывается как:

$$\xi = V_n / V_0.$$

Мощность N (кВт) электродвигателя барабана:

$$N = 0,078 D_0^3 l_0 \rho_n k_b n,$$

где k_b — коэффициент, зависящий от вида насадки и степени заполнения барабана: для подъемно-лопастных насадок $k_b=12\dots14\%$; распределительных - $k_b=20,6\%$.

Расчет распылительной сушильной установки

Общую площадь поверхности частиц F (m^2) в конце распылительной сушики можно определить по формуле:

$$F = 6G / (d_{cp} \rho_n),$$

где G — количество распыленного продукта, кг; ρ_n — плотность продукта, кг/ m^3 .

Средний диаметр частиц продукта d_{cp} (м) рассчитывается по формуле:

- при дисковом распылении:

$$d_{cp} = (1/w)(\sigma / (R\rho_n))^{1/2},$$

где w — угловая скорость вращения диска, рад/с; σ — поверхностное натяжение продукта, Н/м; R — радиус диска, м;

- при форсуночном распылении:

$$d_{cp} = 8k\sigma g / (\rho_b v_n),$$

где k — коэффициент, зависящий от свойств жидкости;
 ρ_v — плотность воздуха, кг/м³; v_n — скорость струи продукта, входящего в сопло, м/с.

Продолжительность распылительной сушки τ_c (с) определяется по уравнению:

$$\tau = 0,167 Q \rho_n d_{cp} / (\alpha \Delta t_{cp} G_1),$$

где Q — количество теплоты, отдаваемой продукту воздухом, Дж/с; α — коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности частицы, Вт/(м²·К); Δt_{cp} — средняя разность между температурами воздуха и продукта, К; G_1 — масса исходного продукта, подаваемого в сушилку, кг/с;

$$\Delta t_{cp} = (t_1 - t_2) / \ln[(t_1 - t_m) / (t_2 - t_m)],$$

где t_1 и t_2 — начальная и конечная температура воздуха, К; t_m — средняя температура мокрого термометра, К.

Количество теплоты Q (Дж/с), передаваемой от воздуха к продукту:

$$Q = Wr + G_1 c_1 (T_2 - T_1),$$

где W — количество испаренной влаги, кг/с; r — теплота испарения влаги, Дж/кг; c_1 — теплоемкость продукта, Дж/(кг·К); T_1 и T_2 — начальная и конечная температура продукта, К.

Напряжение объема сушильной камеры по испаренной влаге A [кг/(м³·с)] определяют по формуле:

$$A = \alpha_v \Delta t_{cp} / r,$$

где α_v — объемный коэффициент теплообмена, Вт/(м³·К);

$$\alpha_v = \alpha F / V_k,$$

где V_k — объем сушильной камеры, м³.

Производительность распылительной сушилки по испаренной влаге W (кг/с) равна:

$$W = AV_k.$$

Расчет сушильных установок со взвешенным слоем высушиваемого продукта

В расчетах аппаратов с кипящим слоем рассчитывают критическую скорость кипения для частиц материала максимального диаметра d_{\max} (м) из соотношения:

$$Re = Ar / (1400 + 5,22 \sqrt{Ar})$$

где $Ar = g d_{\max}^2 (\rho_1 - \rho_2) v_t^2 \rho_2$ — число Архимеда;

ρ_1, ρ_2 — соответственно плотности продукта и сушильного агента, кг/м³;

v_t — коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, м²/с.

Откуда критическая скорость кипения v_k (м/с) определяется как:

$$v_k = Re v_t / d_{\max},$$

причем для обеспечения устойчивого режима кипения средняя скорость сушильного агента в аппарате равна:

$$v = (2...3) v_k.$$

Площадь газораспределительной решетки аппарата F (м²) рассчитывается в виде:

$$F = L/v,$$

где L — средний объемный расход воздуха в сушилке, м³/ч.

Коэффициент межфазного теплообмена для частиц продукта со средним диаметром d (м) определяется из уравнения:

$$Nu = 0,4(Re/\varepsilon)^{0,67} Pr^{0,33},$$

где ε — средний коэффициент порозности слоя, $\varepsilon = (0,55..0,7)$;

$Pr = v_t/a$ — число Прандтля;

a — коэффициент температуропроводности агента сушки, м²/с.

Коэффициент межфазного теплообмена α [Вт/м²·К] равен:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d,$$

где λ — коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/(м·К).

Средний температурный напор теплоносителя Δt (°C) составит:

$$\Delta t = (t_1 - t_2) / \ln[(t_1 - \Theta) / (t_2 - \Theta)],$$

где t_1 , t_2 — температуры воздуха на входе в сушилку и на выходе из нее, °C; Θ — конечная температура продукта, °C.

Требуемая поверхность дисперсного продукта в сушилке S (m^2) равна:

$$S = Q / 3,6 \alpha \Delta t,$$

где Q — теплота, полезно используемая в сушилке, кДж/ч.

Объем слоя высушиваемого продукта V (m^3) в сушилке:

$$V = [d / G \varphi (1 - \varepsilon)] / S,$$

где G — производительность сушилки, кг/ч; φ — коэффициент формы частиц продукта.

Минимальная высота слоя h_{\min} (м) продукта в аппарате:

$$h_{\min} = V / F.$$

Высоту слоя высушиваемого материала, обеспечивающую требуемую среднюю продолжительность процесса сушки, определяют из соотношения:

$$h = G \tau / \rho_1 F (1 - \varepsilon),$$

где τ — продолжительность сушки, ч.

4 РАСЧЕТ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Вспомогательное оборудование составляет значительную часть сушильной установки; так, в конвейерных сушильных установках с отдельно стоящими калориферами объем сушильного аппарата (камеры) составляет 20—40 % от объема вспомогательного оборудования и только 15—30 % от объема всей установки в целом. Поэтому показатели производительности и удельных затрат при оценке совершенства современных сушильных установок, оснащенных сложным вспомогательным оборудованием, должны относиться не только непосредственно к сушильному аппарату, но и ко всей установке в целом. При этом важное значение имеет также учет коэффициента надежности работы оборудования.

4.1 РАСЧЕТ КАЛОРИФЕРОВ

Для нагревания воздуха в сушильных установках пищевой промышленности применяются газовые, паровые и водяные калориферы. В газовых калориферах греющим теплоносителем являются в большинстве случаев топочные газы (такие калориферы имеют самостоятельные топки и называются огневыми) и реже отходящие газы от тепловых агрегатов. В паровых калориферах воздух нагревается насыщенным водяным паром, подаваемым из котельной; в водяных калориферах воздух нагревается горячей водой.

Поверхность нагрева огневых калориферов обычно выполняется из гладких труб — стальных (максимально допустимая температура газов 700—750°С; например, калорифер в сушилках СБТ, СОТ и др.) или чугунных труб (максимально допустимая температура газов 900°С; например, отдельно расположенный калорифер ВНИИХПа).

В некоторых конструкциях поверхностью нагрева являются кирпичные каналы. Для снижения температуры топочных газов в трубчатые огневые калориферы добавляют наружный воздух, что снижает КПД калорифера. Поэтому для обогрева калориферов целесообразно использовать отходящие газы тепловых установок.

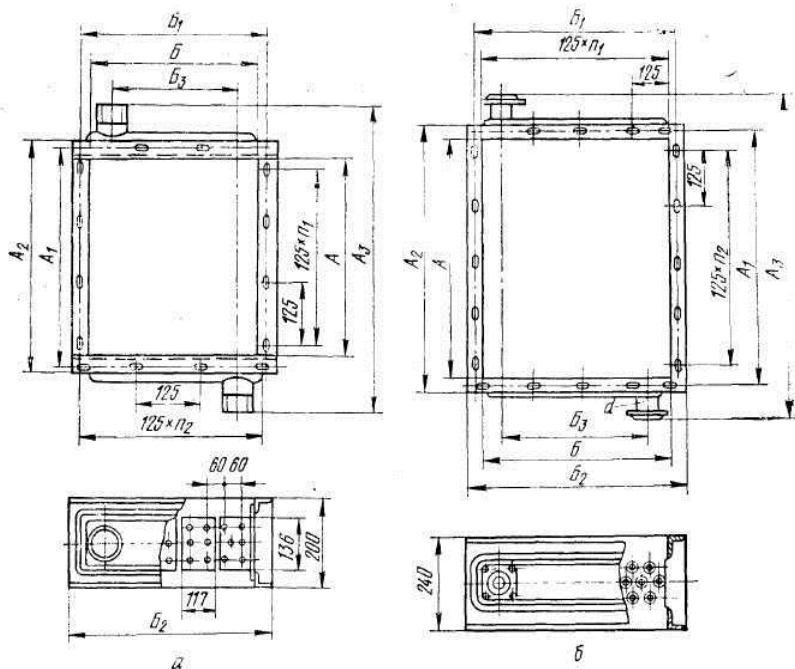


Рисунок 4.1 - Схема и конструктивные размеры (в мм)
калориферов: *а* — КВБ; *б* — КФБО

Паровые и водяные калориферы обычно применяются стандартных типов. В последние годы выпускаются стальные калориферы моделей КВБ, КЗПП, К4ПП, КФСО, КФБО, КПС, КПБ (одноходовые), КЗВП, К4ВП, КВС-П, КВБ-П, которые могут быть использованы для сушильных установок. Одноходовые калориферы имеют вертикальное расположение трубок, многоходовые — горизонтальное; рекомендуется при использовании в качестве теплоносителя пара применять одноходовые модели, при использовании воды — многоходовые калориферы. В таблицах 4.1 – 4.4 приведены технические данные и конструктивные размеры двух типов калориферов: КВБ (стальные, пластинчатые, одноходовые) и КФБО (спирально-навивные, одноходовые), а на рисунке 4.1 - конструктивные эскизы калориферов.

Таблица 4.1 - Технические данные калориферов КВБ

Марка и номер калорифера	Площадь поверхности нагрева, м ²	Площадь живого сечения, м ²		Масса с оцинковкой, кг.
		по воздуху	по теплоносителю	
КВБ-2	9,9	0,115	0,0046	53
КВБ-3	13,2	0,154	0,0061	69
КВБ-4	16,7	0,195	0,0061	85
КВБ-5	20,9	0,244	0,0076	106
КВБ-6	25,3	0,295	0,0076	125
КВБ-7	30,4	0,354	0,0092	152
КВБ-8	35,7	0,416	0,0092	174
КВБ-9	41,6	0,486	0,0107	201
КВБ-10	47,8	0,558	0,0107	224

Основной задачей расчета калорифера является определение площади его поверхности нагрева. Этот расчет аналогичен расчету любого теплообменного аппарата рекуперативного типа. Площадь поверхности нагрева определяют по уравнению:

$$Q = k \Delta t_{cp} F,$$

где Q - расчетное количество теплоты, необходимое для подогрева воздуха, кВт (известно из теплового расчета сушилки);

k - коэффициент теплопередачи от греющего теплоносителя к воздуху, Вт/(м²К);

Δt_{cp} - средний температурный напор, или средняя для всей поверхности нагрева разность температур греющего теплоносителя и воздуха, °С.

Из этой формулы необходимая площадь поверхности нагрева

(в м²):

$$F = Q / (\Delta t_{cp} k).$$

Коэффициент теплопередачи (в Вт/(м² К) рассчитывают по следующим формулам:

- для плоской стенки:

$$k = 1 / (1 / \alpha_1 + \delta / \lambda + 1 / \alpha_2);$$

- для трубы:

$$k_{тр} = 1 / (1 / (\alpha_1 d_{вн}) + (1 / 2 \lambda) \ln (d_{нар} / d_{вн}) + 1 / (\alpha_2 d_{нар})).$$

Величина $k_{тр}$ относится к 1 м трубы и называется линейным коэффициентом теплопередачи; $d_{нар}$ и $d_{вн}$ - наружный и внутренний диаметры трубы (в м). Для перехода от $k_{тр}$ к k пользуется таким уравнением:

$$k = k_{тр} \pi L / \pi d_{нар} L = k_{тр} / d_{нар}.$$

Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 рассчитывают по известным формулам теплопередачи, которые обычно представляют в виде критериальной зависимости:

$$Nu = f (Re^n Pr^m).$$

Скорость воздуха V зависит от объема проходящего воздуха (в м³/с) и площади живого сечения калорифера $F_{ж}$ (в м²).

Для гладкотрубного калорифера:

$$F_{ж} = (a + 1) (S_1 - d)L$$

где a - число труб в одном ряду, перпендикулярном потоку воздуха;

($S_1 - d$) - зазор между трубами, м;

L — длина труб, м.

В газовых калориферах значение k зависит от скорости газов и воздуха и от их средней температуры. Расчеты показывают, что для гладкотрубных газовых калориферов, применяемых в сушильных установках пищевой промышленности (калориферы типа, ВНИИХП, СБТ), при скорости воздуха 5-10 м/с и скорости газов 12-15 м/с значение k может быть для приближенного расчета принято в пределах: 9,2-17,4 Вт/(м² К) или для трубы 2" : $k_{тр} = 0,46 - 0,92$ Вт/(мК)

Таблица 4.2 - Технические данные калориферов КФБО

Марка и номер калорифера	Площадь поверхности нагрева, м ²	Площадь живого сечения, м ²		Масса с оцинковкой, кг.
		по воздуху	по теплоносителю	
КФБО-2	13,02	0,0913	0,0081	62,5
КФБО-3	16,28	0,112	0,01	77,8
КФБО-4	20,68	0,143	0,011	94,5
КФБО-5	26,88	0,182	0,0132	121
КФБО-6	32,55	0,222	0,0132	142
КФБО-7	40,06	0,271	0,0163	152,2
КФБО-8	47,04	0,318	0,0163	174,8
КФБО-9	55,86	0,375	0,0193	206,5
КФБО-10	64,29	0,431	0,0193	230,2

Для паровых калориферов из ребристых труб (например, в сушилке типа КС-2) коэффициент теплопередачи может быть ориентировочно рассчитан по формуле:

$$k = A V_0^n,$$

где V_0^n - скорость воздуха в самом узком сечении, отнесенная к 0 °С и 0,1 МПа.

A, n – коэффициенты, значения которых приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.3 - Значения коэффициентов А и n

Конструкция калорифера	Значения коэффициентов	
	А	n
Одиночные трубы	8,35	0,36
Батарея с коридорным расположением труб	10,21	0,40
Батарея с шахматным расположением труб	10,21	0,48

Для калориферов моделей КВБ и КФБО коэффициент теплопередачи [Вт/($M^2 K$)] рассчитывается по формулам:

- для паровых калориферов:

$$k = A(v \rho)^n;$$

- для водяных калориферов:

$$k = A(v \rho)^n (v_g)^m,$$

где А, n, m - коэффициенты (значения их приведены в табл. 4.4);

$v \rho$ — массовая скорость воздуха в живом сечении калорифера, кг/($M^2 c$);

v_g - скорость воды, м/с.

Таблица 4.4 - Значения коэффициентов А, n, m

Коэффициенты	Тип и модель калорифера					
	паровой		Водяной при $v_g = 0,02 \dots 0,25$ м/с		водяной при $v_g = 0,25 \dots 1$ м/с	
	КВБ	КФБО	КВБ	КФБО	КВБ	КФБО
А	17,75	16,47	21,41	20,76	17,75	14,73
N	-	0,351	0,456	0,257	0,381	0,34
m	-		0,192	0,178	0,49	0,133

4.2 РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ И ВЫБОР ВЕНТИЛЯТОРА ДЛЯ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В сушильной технике применяют радиальные (центробежные) и осевые вентиляторы.

Осевые вентиляторы применяют для создания полного давления до 800 Па. Температура перемещаемого воздуха $t \leq 80^\circ\text{C}$.

Центробежные вентиляторы применяют для создания полного давления до 1000 Па (вентиляторы низкого давления), 3000 Па (вентиляторы среднего давления), от 3000 до 12 000 Па (вентиляторы высокого давления).

Центробежные вентиляторы бывают с правым вращением колеса (по часовой стрелке (см. рисунок 3.2), если смотреть со стороны всасывания) и с левым вращением колеса (против часовой стрелки). На рисунке 3.2 показаны вентиляторы правого и левого вращения с различными положениями кожуха.

В последние годы выпускаются вентиляторы марок В-Ц4-70, В-Ц4-76, В-Ц14-46 и др.

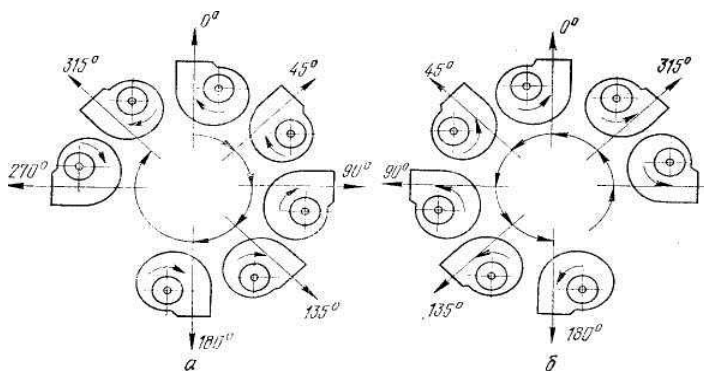


Рисунок 4.2 - Расположение корпусов радиальных (центробежных) вентиляторов правого (а) и левого (б) вращения

Вентилятор для сушильной установки выбирают в зависимости от максимального объема перемещаемого воздуха V (в $\text{м}^3/\text{ч}$) и требуемого давления H (в Па), которое должно преодолевать сопротивление всей системы и обеспечить перемещение воздуха с

заданной скоростью.

Полное давление H рассчитывают по формуле

$$H = \Delta S + h_{\text{дин}} ,$$

где ΔS - статическое давление, потребное для преодоления гидравлического сопротивления системы, Па;

$h_{\text{дин}}$ - динамическое (или скоростное) давление, необходимое для создания требуемой скорости на выходе из системы, Па .

$$h_{\text{дин}} = \gamma v_e^2 / (2g),$$

где γ - удельный вес воздуха, Н/м^3 ; v_e - средняя скорость воздуха, м/с; g - ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Гидравлическое сопротивление системы

$$\Delta S = \Sigma R + \Sigma z + \Delta S_{\text{кал}} ,$$

где ΣR - сумма сопротивлений трения в воздуховодах;

Σz - сумма местных сопротивлений (повороты, вход в трубу, выход и т. п.); $\Delta S_{\text{кал}}$ - сопротивление воздушного тракта в калорифере.

Сопротивление трения в воздуховодах определяется по формуле

$$\Sigma R = \Sigma [f (l/d) \gamma v^2 / 2g]$$

где f - коэффициент сопротивления трения, зависящий от значения критерия Re ; l - длина воздуховода; d - диаметр воздуховода.

Для гладких железных труб f может рассчитываться по формуле Г. К. Филоненко (при $Re > 5000$):

$$f = 0,303 / (\lg Re - 0,9)^2 .$$

Для облегчения расчетов составлены специальные номограммы и таблицы, по которым находят R_1 (сопротивление 1 м трубы) и скоростной напор $\gamma v^2 / 2g$ в зависимости от количества воздуха (в $\text{м}^3/\text{ч}$) и диаметра воздуховода (d) (v - средняя скорость воздуха на рассчитываемом участке трубы). Для воздуховода прямоугольного сечения ($a \times b$) в расчет вводят эквивалентный диаметр:

$$d_{\text{экв}} = 2ab/(a + b).$$

Сумма сопротивлений трения в воздуховодах

$$R = \sum R_1 l,$$

где l - длина рассчитываемого участка, м.

Потери на трение в кирпичных каналах примерно в 2-3 раза больше, чем в железных из-за шероховатости поверхности. Потери напора на местные сопротивления рассчитывают по формуле:

$$\sum z = \sum (\xi \gamma v^2 / 2g),$$

здесь ξ - коэффициент местного сопротивления (выбирается по справочным таблицам).

Значения $\gamma v^2 / 2g$ берутся из таблиц для удельного веса воздуха при $t = 20$ °С.

Сопротивление калорифера зависит от его конструкции и скорости воздуха и может быть определено по приведенной ниже формуле:

$$\Delta S_{\text{кал}} = \xi \gamma v^2 / 2g.$$

Сопротивление проходу воздуха (в Па) в калориферах КВБ и КФБО рассчитывается (для одного ряда калориферов) по формуле вида (9):

$$\Delta S_{\text{кал}} = A(v \rho)^n,$$

где $v \rho$ — массовая скорость воздуха в живом сечении калорифера, кг/(м² с);

Значения коэффициентов A и n составляют для калорифера КВБ 1,52 и 1,69, а для калорифера КФБО – 4,3 и 1,94.

Мощность на валу двигателя вентилятора (в кВт) рассчитывают по формуле:

$$N = v_g H / (3600 * 1000 \eta_g \eta_m \eta_n),$$

где η_g - гидравлический КПД вентилятора (по аэродинамической характеристике);

η_m - механический КПД вентилятора, учитывающий потери на трение в

подшипниках, а также потери на трение диска колеса вентилятора о воздух;

$\eta_m = 0,95 - 0,97$; η_n - КПД передачи от электродвигателя к вентилятору; например, для клиноременной передачи $\eta_n = 0,95$.

Установочную мощность принимают с запасом на 10 - 15 %.

4.3 РАСЧЕТ ЦИКЛОНА ТИПА ВТИ

Расчет скорости воздуха на входе в циклон

Вектор скорости движения сушильного агента V складывается из тангенциальной и аксиальной составляющих.

Определим тангенциальную скорость:

$$V_{\varphi} = (22 + 0,34V_{\text{вх}}) * \left[\frac{4r_{\text{вых}} * r}{r_{\text{вых}}^2 + 4r^2} + \left(\frac{r}{2,5R_K} \right)^3 \right],$$

где $r_{\text{вых}} = \frac{D_{\text{вых}}}{2}$ - радиус выходного патрубка сушилки;

r - путь перемещения частиц в радиальном направлении;

$V_{\text{вх}}$ - скорость газа на входе в камеру;

R_K - радиус камеры.

Определим аксиальную скорость:

$$V_z = -5,1 * \sqrt{D_K} * \left[0,9 - \frac{r}{R_K} - \left(\frac{0,9 * r}{R_K} \right)^3 \right] * \left[\frac{r}{R_K} + 0,14 \right]^{-1},$$

где r - текущая величина радиуса, мм

D_K - диаметр камеры, мм.

Полная скорость рассчитывается по формуле

$$V = \sqrt{V_{\varphi}^2 + V_z^2}.$$

Расчет секундного расхода газа, поступающего в циклон

$$V_{\text{сек}} = L * V_0,$$

где L - расход газа, определенный в материальном балансе;

V_0 - начальная относительная скорость частицы (в пределах 1 - 2

M^3 вл./кг сух.вещ).

Определение размеров циклона

Площадь сечения входного патрубка циклона рассчитывается по формуле:

$$f = b \cdot h = V_{сек} / V ,$$

где b и h - соответственно ширина и высота входного патрубка, мм.

Для циклона типа ВТИ $h = 4b$, тогда:

$$f = 4 \cdot b^2 = V_{сек} / V ,$$

$$b = 0,5 \cdot \sqrt{V_{сек} / V} .$$

Предварительное значение диаметра циклона:

$$D = 5,9 \cdot b$$

Внутренний диаметр выхлопной трубы:

$$d_{внут} = 1,13 \sqrt{V_{сек} / V_m} ,$$

где V_m - скорость воздуха в выхлопной трубе.

Наружный диаметр выхлопной трубы:

$$d_{наруж} = d_{внут} + 2\delta ,$$

где δ - толщина стенки циклона, равная 0,01м.

Диаметр циклона:

$$D = d_{наруж} / (1 - 10 \cdot V_{oc} / V_2) ,$$

где d - диаметр частиц высушиваемого материала;

V_{oc} - скорость осаждения частиц, рассчитываемая по формуле:

$$V_{oc} = d^2 \cdot (\rho_2 - \rho) \cdot V_2^2 / (9 \cdot \nu \cdot \rho \cdot D) ,$$

где ρ_2 - насыпная плотность материала;

ρ - плотность воздуха;

ν - кинематический коэффициент воздуха;

V_2 - окружная скорость воздуха в циклоне, $V_2 = 13$ м/с.

Высота цилиндрической части циклона:

$$h_1 = 2 \cdot V_{сек} / [(D - d_{наруж}) \cdot V_2] .$$

Высота конической части циклона:

$$h_2 = 0,86 * D .$$

4 Расчет гидравлического сопротивления циклона

$$\Delta\rho_2 = \xi * V_{ex}^2 * p / 2, \text{ (Па)}$$

где ξ - коэффициент гидравлического сопротивления для циклона типа ВТИ, равный 105.

5 КОНСТРУКЦИИ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Конструкции сушилок разнообразны и классифицируются по ряду, признаков:

- по способу организации процесса (периодические и непрерывные);
- по направлению движения теплоносителя относительно материала (прямоточные, противоточные, с перекрестным током);
- по величине давления в рабочем пространстве (атмосферные, вакуумные, под избыточным давлением);
- по виду используемого теплоносителя (воздушные, на дымовых или инертных газах, на насыщенном или перегретом паре, на жидких теплоносителях);
- по способу подвода теплоты (конвективные, контактные, радиационные, с нагревом токами высокой частоты, с акустическим или ультразвуковым нагреванием);
- по виду высушиваемого материала и т.д.

СУШИЛКИ С НЕПОДВИЖНЫМ ИЛИ ДВИЖУЩИМСЯ ПЛОТНЫМ СЛОЕМ МАТЕРИАЛА

Камерные сушилки (рисунок 5.1) представляют собой герметичные камеры, внутри которых высушиваемый материал в зависимости от его вида располагается на сетках, противнях, шестах, зажимах и других приспособлениях.

Камеры изготовляют из дерева, кирпича, бетона, металла и иных материалов, выбор которых обусловлен их размерами, температурным режимом процесса, а в ряде случаев также свойствами высушиваемого материала. Объем и размеры камеры определяются продолжительностью сушки и производительностью аппарата. Для ускорения загрузки и выгрузки материала *противни*

или сетки для его укладки размещают часто на вагонетках.

Свежий воздух с помощью вентилятора 3 через калорифер 2 подают в пространство камеры, внутри которой находятся полки 1 с высушиваемым материалом. Заслонки 5, 6 служат для регулирования расходов рециркулирующего и отработанного воздуха

К достоинствам камерных сушилок относится прежде всего простота их устройства, но они обладают рядом существенных недостатков: периодичность действия, большая затрата ручного труда на загрузку и выгрузку материала, низкая производительность и неравномерность высушивания из-за наличия неподвижного толстого слоя материала и т.д. Как правило, их применяют для сушки сравнительно небольших количеств материала и при достаточно большой продолжительности процесса.

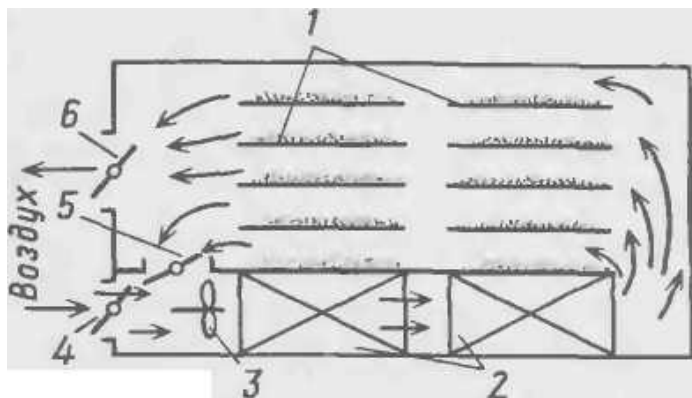


Рисунок 5.1- Камерная сушилка

1 -полки для загрузки высушиваемого материала;
2 -калорифер; 3 -вентилятор; 4 -заслонка для регулирования расхода свежего воздуха; 5, 6 - заслонки (шиберы) для регулирования расходов рециркулирующего и отработанного воздуха.

Зерносушильный агрегат ДСП-32-ОТ открытого типа предназначен для сушки сырого зерна кукурузы, пшеницы, ржи, ячменя, овса, семян подсолнечника и других зерновых культур.

Зерносушильный агрегат такого типа (рисунок 5.2) состоит из двух параллельно работающих шахт 3 высотой 11,57 м. Каждая из них состоит из семи секций и по высоте делится на три зоны: первая зона

сушки высотой 4,95 м расположена на верхней части шахты; вторая зона сушки высотой 2,85 м находится в средней части шахты; третья зона является охладительной. Высота одной секции составляет 1,65 м, причем в каждой секции расположено 8 рядов коробов по 16 в каждом ряду. Шахта по высоте имеет 27 рядов подводящих и 29 рядов отводящих коробов. Агент сушки и воздух подаются вентиляторами 1, 6 и 8 в распределительные камеры для зон сушки и охлаждения. Сырое зерно самотеком поступает в надсушильный бункер 2 и далее равномерно распределяется по сушильным шахтам 3 и по охладительной шахте 10. Из шахт зерно выпускается выпускным механизмом 11 периодического действия. Агент сушки из топки 9 вентиляторами 6 и 8 через всасывающие воздуховоды 4 и 7 подают в напорно-распределительные камеры первой и второй зон сушки. Подача сушильного агента регулируется, исполнительным механизмом 5. Атмосферный воздух вентилятором 1 также подается в напорно-распределительную камеру охладительной шахты 10. Надшахтный бункер 2 "высотой 2,5 м и вместимостью около 20 м (15 т зерна) выполнен из листовой стали. Под каждой шахтой имеются выпускные механизмы 11 периодического действия и подсушильные бункеры 12. Зерно из них попадает на транспортер, а далее — в норию и на склад.

В зерносушилке ДСП-32-ОТ агент сушки выполняет роль как теплоносителя, так и влагоносителя (испаренная влага из зерна поглощается агентом сушки и выносится в атмосферу) и представляет собой смесь топочных газов с воздухом.

Техническая характеристика зерносушильного агрегата ДСП-32-ОТ

Производительность по пшенице продовольственного назначения при снижении влажности с 20 до 14%, т/ч.....	32
Количество испаренной влаги, кг/ч.....	23,00
Удельный расход условного топлива (при температуре наружного воздуха 5 °С и относительной влажности 75 %), кг/пл.т.....	12,2
Расход дизельного топлива, кг/пл. т:	
- удельный.....	8,5
- часовой.....	272
Удельный расход теплоты, кДж/кг.....	5040

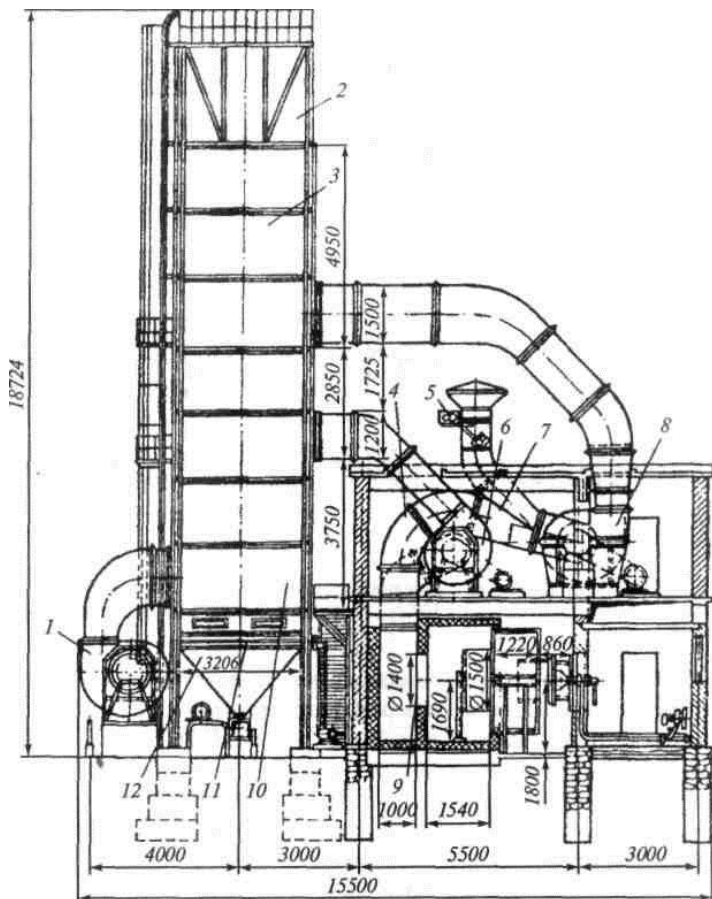


Рисунок 5.2 - Зерносушильный агрегат ДСП-32-ОТ

Мощность, кВт:

- установленная 125

- потребляемая 49,2

Удельный расход электроэнергии, кВтч/плт 3,1

Температура сушильного агента в зоне сушки, °С:

- первой 50...130

- второй 50...160

Число рядов коробов:

- в первой зоне сушки 23

- во второй зоне сушки	14
- в зоне охлаждения	18
Число коробов в одном ряду	16
Расход сушильного агента в зоне сушки, м ³ /ч:	
- первой	80 000
- второй.....	42 000
Расход атмосферного воздуха на охлаждение зерна, м ³ /ч.....	4900
Вентилятор первой зоны:	
- тип.....	Ц4-76 № 12
- частота вращения, мин ⁻¹	980
Вентилятор второй зоны:	
- тип.....	Ц4-76 № 10
- частота вращения, мин ⁻¹	1050
Вентилятор зоны охлаждения:	
- тип	Ц4-76 № 12
- частота вращения, мин ⁻¹	630
Габаритные размеры агрегата (с топкой), мм.....	15 500x8 300x18 724
Масса зерносушильного агрегата, кг.....	32 600

Туннельные сушилки (рисунок 5.3) - аппараты непрерывного действия, представляющие собой длинные камеры.

Внутри камеры по рельсам медленно перемещается ряд вагонеток 1, загруженных высушиваемым материалом. Поток нагретого воздуха, нагнетаемый вентилятором 2 через калорифер 3, проходит вдоль камеры, омывая высушиваемый материал (в данном случае противотоком) и испаряя влагу. Торцы камеры закрываются плотно прилегающими дверями-шлюзами 4, периодически открывающимися для удаления с одного конца вагонетки с высушенным материалом и загрузки с другого конца вагонетки с влажным материалом.

Туннельные сушилки обычно используют для сушки большого числа штучных материалов, например керамических изделий. По интенсивности процесса они мало отличаются от камерных и им присущи основные недостатки последних (длительная и неравномерная сушка, ручное обслуживание).

Ручная укладка высушиваемого материала на полки вагонеток и выгрузка из них высушенного материала требуют большой затраты ручного труда.

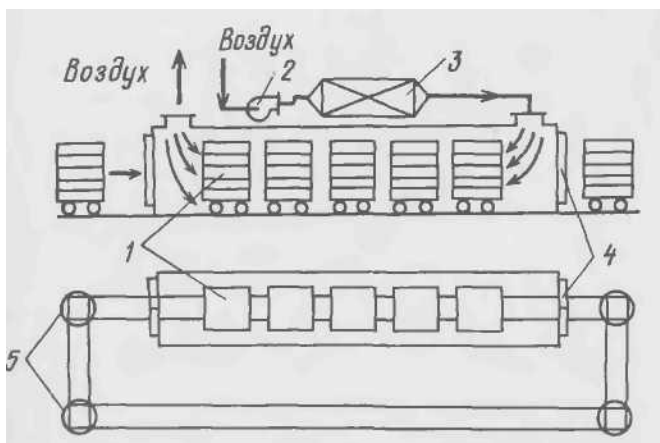


Рисунок 5.3 - Туннельная сушилка:

1 -вагонетки; 2 -вентилятор; 3 -калорифер; 4 -герметичные двери; 5 -поворотные круги.

Для ликвидации этого недостатка при сушке сыпучих материалов вагонетки можно заменять пластинчатыми, ленточными или ковшовыми транспортерами, допускающими непрерывную подачу влажного и удаление высушенного материала с помощью механических питателей. В этом случае выгоднее, однако, заменить туннель короткой камерой, в которой друг над другом (с небольшим смещением по длине) расположено несколько ленточных, пластинчатых или ковшовых транспортеров. Высушиваемый материал непрерывно поступает на верхнюю ленту, пройдя которую, он ссыпается на вторую ленту, и так далее до выхода из аппарата. Нагретый поток воздуха омывает высушиваемый материал в прямотоке или противотоке.

Общий недостаток камерных и туннельных сушилок состоит в плохом перемешивании высушиваемых материалов, обуславливающим неравномерность их сушки.

Ленточные сушилки (рисунок 5.4) предназначены для сушки сыпучих (зернистых, гранулированных, крупнодисперсных) и волокнистых материалов, а также готовых изделий и полуфабрикатов. Для тонкодисперсных пылящих материалов ленточные сушилки не используются, так как пыль трудно удерживается на ленте и оседает

на калориферах, яри этом пыль органических веществ может обугливаться и даже возгораться. Ленточные сушилки особенно целесообразны для сушки формованных изделий и гранулированных катализаторов, когда не допускается расслоение или повреждение формы.

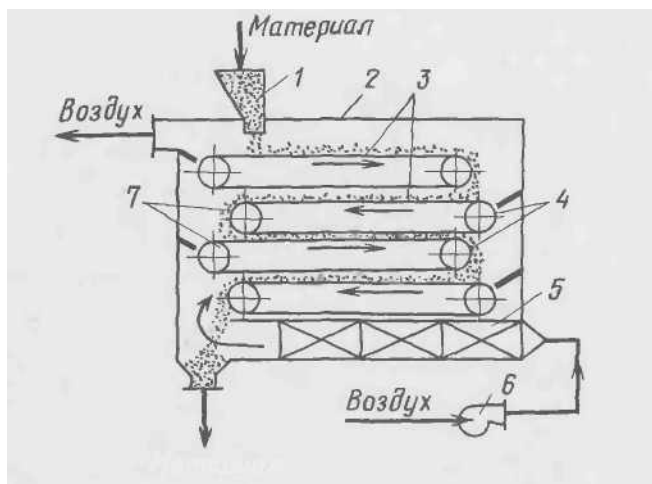


Рисунок 5.4 - Многоярусная ленточная сушилка:

- 1 -питатель; 2 -сушильная камера; 5 -ленточные транспортеры;
4 -ведущие барабаны; 5 -калорифер; 6 -вентилятор; 7 -ведомые барабаны.

В этих сушилках сушка производится непрерывно при атмосферном давлении. В камере 2 многокорпусной сушилки слой высушиваемого материала движется на бесконечных лентах (транспортерах) 3, натянутых между ведущими 4 и ведомыми 7 барабанами. При пересыпании материала с ленты на ленту увеличивается поверхность его соприкосновения с сушильным агентом, что способствует возрастанию скорости сушки. Ленточные сушилки работают непрерывно с рециркуляцией газа и без нее; в некоторых конструкциях предусмотрен внутренний многократный подогрев газообразного теплоносителя, в качестве которого используют топочные газы, воздух, а иногда-перегретый пар.

Наряду с сушкой в сушилках этого типа можно проводить прокаливание и охлаждение материалов, причем такие установки

отличаются от обычных только числом ярусов транспортера. Конструкция ленточного транспортера обусловлена свойствами высушиваемого материала. Транспортеры могут выполняться в виде металлической плетеной сетки, перфорированной штампованной или пластинчатой ленты, отдельных прямоугольных лотков с укрепленной в них сеткой. Все сушилки этого типа работают с продувкой слоя движущегося материала потоком теплоносителя.

В *ленточных сушилках* легко осуществляются прямоток, противоток и смешанная схема движения теплоносителя и продукта. Сушилки с одним транспортером обычно делают многозонными в направлении движения материала. Для более равномерной сушки газообразный теплоноситель сначала подают под ленту и пропускают через слой материала, а затем пропускают над слоем. Зоны сушки могут различаться не только направлением газового потока, но и температурой, влажностью, скоростью прохождения газа через слой. В зоне влажного материала применяют большие скорости газового потока, чем в зоне сухого продукта.

В многоленточных сушилках газовый поток используют многократно, пропуская его снизу вверх последовательно через несколько транспортеров с материалом. Перед каждым слоем его подогревают в калориферах, установленных между лентами. В некоторых случаях под каждую ленту подают добавочный свежий теплоноситель. С целью более равномерной сушки в некоторых конструкциях ленточных сушилок для перемешивания и выравнивания слоя материала над лентой помещают специальные ворошители.

Основными недостатками сушилок этого типа являются громоздкость, сложность обслуживания, небольшая удельная производительность (с 1 м² поверхности ленты).

Конвейерная сушилка ЧСП-1М (рисунок 5.5) состоит из сушильной камеры 3 с загрузочным элеватором 4, смесительной камеры 1, вентилятора 2 с приводом, разравнивателя 5 и выносных транспортеров. Работает по принципу противотока.

Сушильная камера закрыта со всех сторон, изготовлена из чугунных плит и панелей из листовой стали. В нижней части ее предусмотрен подвал для подачи воздуха. В сушильной камере в четыре ряда установлены пластинчатые конвейеры с опрокидывающимися пластинами, в результате обе ветви каждого конвейера используются в качестве рабочих

поверхностей. Камера снабжена шлюзовым затвором 6 для выгрузки высушенного продукта. Движение конвейеров и механизмов сушильной камеры - от главного привода.

Загрузочный элеватор крепится к сушильной камере, на нем смонтировано разравнивающее устройство с индивидуальным электроприводом.

Теплообменник 7 представляет собой камеру, собранную из чугунных плит. В передней и задней плитах соосно расположены гнезда, в которые вмонтированы калориферные трубы. С целью лучшего теплообмена в них вставлены спирали из листового железа. Боковые плиты (левая и правая) имеют двустворчатые двери из листового материала. К задней плите прикреплен воздухосборник. Топка и камера догорания обмурованы огнеупорным кирпичом. Для подачи и распыления топлива (мазута) топка снабжена форсункой и вентилятором высокого давления.

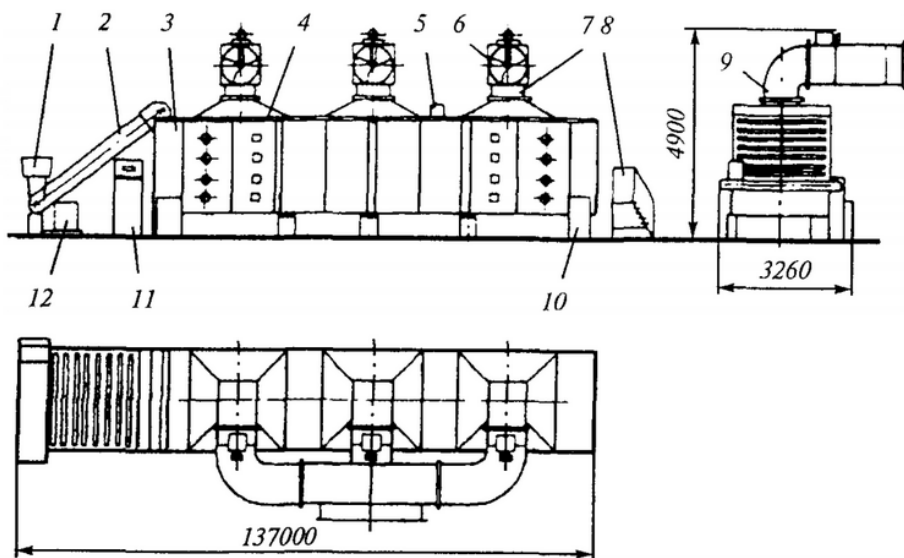


Рисунок 5.5 – конвейерная сушилка ЧСП-1М

Техническая характеристика сушилки ЧСП-1М

Производительность, кг/ч.:

- по сухому чаю.....	100... 120
- по зеленому листу.....	240... 280
Количество испаренной влаги, кг/ч.....	150
Число рабочих ветвей конвейеров.....	4
Температура поступающего воздуха, °С.....	80... 90
Влажность материала, %:	
\/- начальная.....	60... 62
- конечная.....	3... 4
Температура обработавшего воздуха, °С.....	50... 60
Скорость воздуха при прохождении через слой чая, м/с.....	0,5... 0,6
Общая полезная площадь конвейеров, м ²	53
Шаг конвейерной цепи, мм.....	55
Габаритные размеры, мм.....	12 645x4000x4210
Масса (без кирпичной кладки), кг.....	22 850

Барабанные сушилки (рисунок 5.6) широко применяют для непрерывной сушки, как правило при атмосферном давлении, кусковых, зернистых и сыпучих материалов.

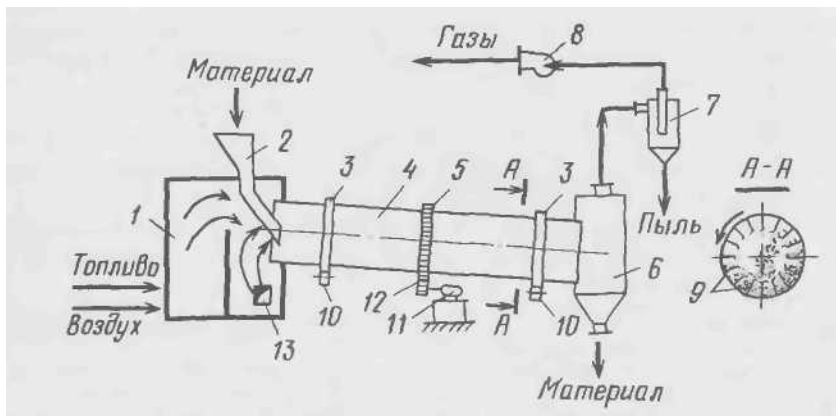


Рисунок 5.6 - схема барабанной сушилки

Барабанная сушилка имеет цилиндрический сварной барабан 4, установленный с небольшим наклоном к горизонту (2-7°) и

опирающийся с помощью бандажей 3 на ролики 10. Барабан приводится во вращение электродвигателем 11 через зубчатую передачу с помощью венда 5. Частота вращения барабана обычно не превышает 5-8 мин⁻¹. Материал подается в барабан питателем 2 и поступает на внутреннюю насадку 9, расположенную вдоль почти всей длины барабана. Насадка, тип которой определяется свойствами высушиваемого материала, обеспечивает равномерное распределение и хорошее перемешивание материала по сечению барабана, а также его тесный контакт с сушильным агентом при пересыпании. Типы насадок представлены на рис.5.7.

Газовая фаза и материал часто движутся прямооток, что помогает избежать перегрева материала, так как в этом случае наиболее горячие газы соприкасаются с материалом, имеющим наибольшую влажность.

Чтобы избежать усиленного уноса пыли с сушильным агентом, последний просасывается через барабан вентилятором 8 со средней скоростью, не превышающей 2-3 м/с. Перед выбросом в атмосферу отработанные газы очищаются от образовавшейся пыли в циклоне 7. На концах барабана устанавливают уплотнительные устройства, затрудняющие утечку сушильного агента.

У разгрузочного конца барабана имеется подпорное устройство в виде сплошного кольца. Назначение этого кольца - поддерживать определенную степень заполнения барабана материалом; как правило, степень заполнения не превышает 20%. Время пребывания обычно регулируется скоростью вращения барабана и реже - изменением угла его наклона. Высушенный материал удаляется через разгрузочную камеру 6. Следует отметить, что эта камера соответствующим образом герметизируется для предотвращения поступления в барабан воздуха извне. Подсосы воздуха привели бы к бесполезному увеличению производительности и энергии, потребляемой вентилятором.

Устройство внутренней насадки барабана (рисунок 5.7) зависит от размера кусков и свойств высушиваемого материала. Подъемно-лопастная насадка (а) используется для сушки

крупнокусковых и склонных к налипанию материалов, секторная (б) - для малосыпучих и крупнокусковых материалов с большой плотностью. Для мелкокусковых сильно сыпучих материалов широко применяются распределительные насадки (в, г). Сушка тонкоизмельченных, пылящих материалов производится в барабанных сушилках, имеющих перевалочную насадку (д) с закрытыми ячейками. Иногда используют комбинацию насадок, например подъемно-лопастную (в передней части аппарата) и распределительную.

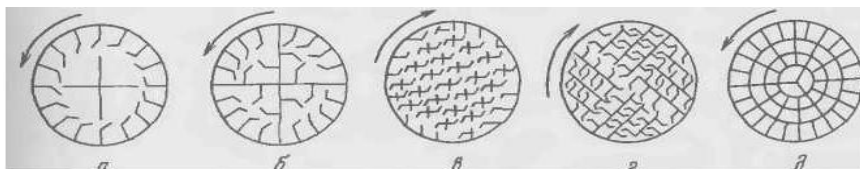


Рисунок 5.7 - Типы насадок барабанных сушилок:

а -подъемно-лопастная; б -секторная,
в, г -распределительные; д –перевалочная.

Барабанные сушилки имеют диаметр от 1 до 3,5 м, причем барабаны диаметром до 2, 8 м могут быть различной длины (отношение длины к диаметру барабана колеблется от 4 до 8), а барабаны диаметром 2,8, 3,0 и 3,5 м выпускаются только одной длины - соответственно 14, 20 и 27 м.

Применяют также барабанные **вакуумные** сушилки, которые работают, как правило, периодически. Их используют для сушки термочувствительных материалов от воды и органических растворителей, а также для сушки токсичных материалов. В зависимости от свойств материала и требований к готовой продукции применяют сушилки среднего (остаточное давление 3-13 кПа) или глубокого (остаточное давление до 133 Па) вакуума.

Вакуумные барабанные сушилки применяют в основном в производстве ядохимикатов, гербицидов, некоторых полимерных материалов, а также в медицинской, пищевой и фармацевтической промышленности.

На рисунке 5.8 представлена барабанная сушилка А1-ИФИ, предназначенная для производства кормовой витаминной муки из обычных кормовых трав.

Установка состоит из следующих основных узлов: теплогенератора 1, сушильного барабана 2, циклона сухой массы 3, системы дробления и отвода муки 4, весовой установки 5 и зашивочной машины. Сушка производится смесью топочных газов с воздухом.

Материал подается в барабан транспортером и передвигается в потоке теплоносителя. Трава постепенно высыхает, а сухие частицы потоком сушильного агента выносятся в циклон сухой массы, в котором отделяются от агента сушки и поступают в дробилку. Отработавший агент сушки через трубу вентилятора-циклона сухой массы выбрасывается в атмосферу.

Измельченная сухая масса через сменное решето потоком воздуха, создаваемого вентилятором, подается в циклон, где отделяется и подается на автоматические весы.

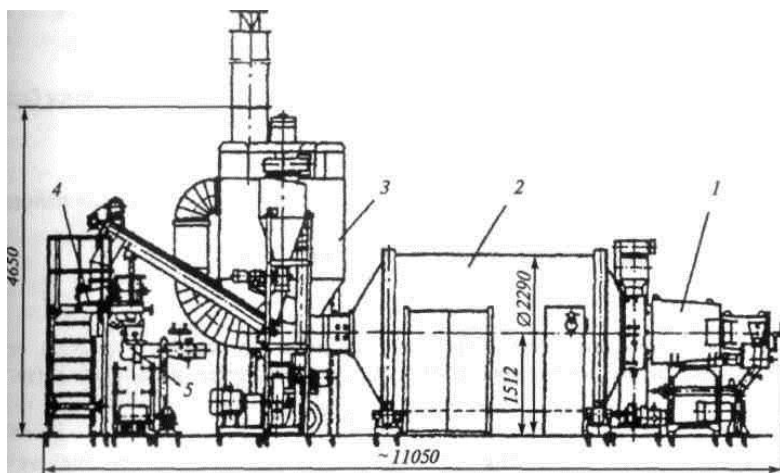


Рисунок 5.8 - Сушилка А1-ИФИ непрерывного действия

Техническая характеристика барабанной сушилки А1-ИФИ

Производительность по кормовой муке, т/ч.....	1,25
Установленная мощность, кВт	55,0
Расход условного топлива, кг/ч	130,0
Испарительная способность сушилки, кг исп. влаги в ч.....	1000
Расход теплоты на испарение 1 кг влаги, кДж.....	3812
Температура сушильного агента, °С.....	600...900
Габаритные размеры, мм	11010x7800x4850
Масса, кг	11 735

Распылительные сушилки (рисунок 5.9) используют для сушки жидких и пастообразных материалов. В них материал диспергируют специальными устройствами и высушивают в потоке газообразного теплоносителя. Время пребывания материала в зоне сушки весьма мало, а высокая степень диспергирования и, как следствие, большая интенсивность испарения влаги обеспечивают быстрое высушивание. Поэтому в распылительных сушилках можно использовать теплоноситель с высокой температурой. Высушенный продукт получается равномерного дисперсного состава, сыпучим и мелкодисперсным. Возможно совместное распыление и одновременное смешение двух и более компонентов. Недостатками распылительных сушилок являются большие габаритные размеры и повышенный расход энергии.

Распыление материала обеспечивается механическими и пневматическими форсунками, а также с помощью центробежных дисков, частота вращения которых составляет 4000-20000 мин⁻¹; при этом окружная скорость на периферии диска находится в интервале 100-160 м/с.

В распылительной сушилке материал подается в камеру 3 с помощью диска 4 (или через форсунку). Сушильный агент движется параллельным током с материалом.

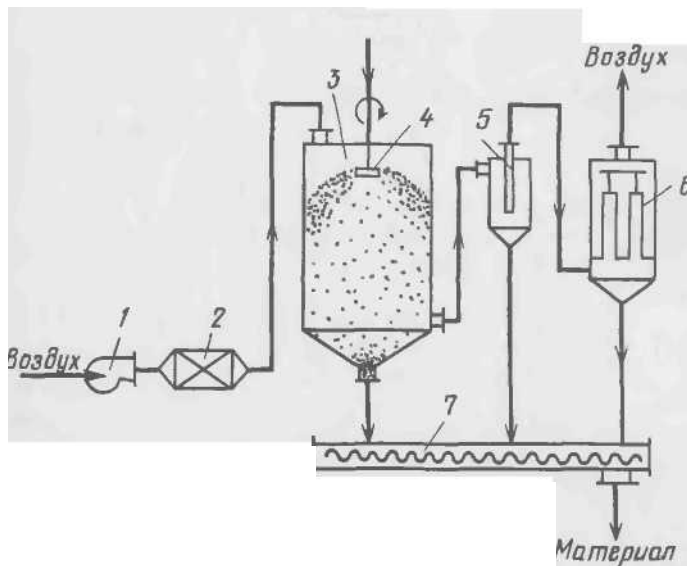


Рисунок 5.9 – схема распылительной сушилки:

1 - вентилятор; 2 - калорифер; 3 - камера сушилки; 4 - диск; 5 - циклон; 6 - рукавный фильтр; 7 - шнек для выгрузки высушенного материала.

Мелкие твердые частицы высушенного материала (размером до нескольких микрометров) осаждаются на дно камеры и отводятся шнеком 7. Отработанный сушильный агент после очистки от пыли в циклоне 5 и рукавном фильтре 6 выбрасывается в атмосферу.

Распыление центробежными дисками (без давления) пригодно для диспергирования суспензий и вязких жидкостей, но требует значительно большего расхода энергии, чем механическое. Распыление механическими форсунками, в которые жидкость подают насосом под давлением 3,0-20,0 МПа, более экономично, но применяется только для жидкостей, не содержащих твердых взвесей, вследствие чувствительности этих

форсунок к засорению. Распыление пневматическими форсунками, работающими с помощью сжатого воздуха под давлением около 0,6 МПа, хотя и пригодно для загрязненных жидкостей, но наиболее дорого из-за большого расхода энергии; кроме того, его недостатком является неоднородность распыления.

Следует отметить, что распылительные сушилки работают также по принципам противотока и смешанного тока. Однако наиболее распространен прямоток, так как он позволяет производить сушку при высоких температурах без перегрева материала, причем скорость осаждения частиц в этом случае определяется скоростью их витания и скоростью сушильного агента. При противотоке скорость осаждения меньше на скорость сушильного агента и, соответственно, больше время пребывания частиц в зоне сушки. Это позволяет получать высушенный материал с низким содержанием влаги.

Для осаждения мелких частиц (средний размер капель обычно составляет 20-60 мкм) и уменьшения уноса скорость газов в камере (считая на ее полное сечение) обычно не превышает 0,3-0,5 м/с. Но даже при таких скоростях унос значителен, и требуется хорошая очистка от пыли отработанных газов. Для более равномерного распределения сушильного агента по сечению камеры используют ввод газа через штуцер, расположенный касательно к корпусу камеры, или через ряд щелей по ее окружности.

Распылительная сушилка СРЦ-8/300-НК (рисунок 5.10) применяется для сушки кормовых дрожжей с нижним подводом теплоносителя. Корпус сушилки 9 представляет собой цилиндрический аппарат с коническим днищем. Раствор распыливается центробежным устройством 13 с помощью диска 10. Сушильный агент подается в верхнюю часть установки по газоподводящей трубке 7, на конце которой установлен диспергатор 8, предназначенный для создания в сушильной камере вращательного движения теплоносителя и его лучшего контакта с продуктом.

Распыленные капли продукта подхватываются потоком продукта и устремляются вниз. Влага испаряется, а мелкий высушенный порошок осаждается в конусном днище и через разгрузочное устройство 1 поступает в систему пневмотранс- порта. Для стряхивания частиц, осевших на стенках, установлены вибраторы 7. Отработанный теплоноситель удаляется через газоотводящую трубу 2 в циклон для отделения порошка. Для осмотра аппарата предусмотрены тележка 4, светильник 6, дверь 5. На корпусе 9 смонтированы предохранительные клапаны 3 и 18 в виде откидывающихся дисков и патрубки 12 для выхлопа сушильных газов при резком увеличении давления. Подъем распыливающего устройства осуществляется электроталью 15, закрепленной на шатре 16.

Техническая характеристика СРЦ-8/300-НК

Производительность по испаренной влаге, кг/ч.....	3000
Температура, °С:	
- на входе	135...470
- на выходе	60... 100
Начальная влажность исходной суспензии, %.....	78..90
Напряженность по испаренной влаге, кг/(м ³ ·ч).....	4... 14
Дисперсность готового продукта, мкм	30...70
Рабочий объем сушильной камеры, м ³	300
Внутренний диаметр, м	6,5
Высота цилиндрической части, м	6,0
Масса, кг	38 000

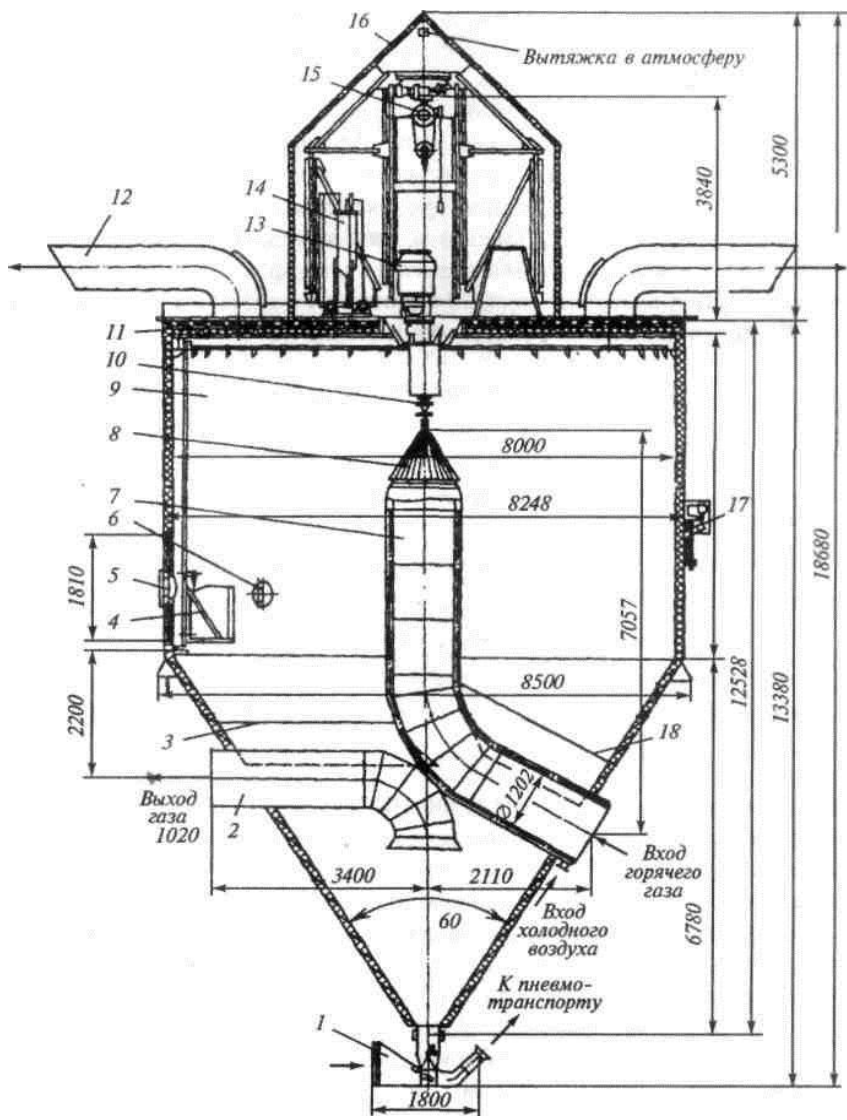


Рисунок 5.10 - Распылительная сушилка СРЦ-8/300-НК

Конвективные сушилки со взвешенным слоем материала. Сушилки с псевдооживленным (кипящим) слоем (рисунок 5.11) получили широкое распространение благодаря следующим специфическим особенностям: во-первых, этим методом можно высушивать зернистые, сыпучие, пастообразные и жидкие материалы; во-вторых, процесс протекает очень интенсивно в силу значительного увеличения поверхности контакта между частицами материала и сушильным агентом. Объемный коэффициент теплообмена, отнесенный к слою материала, равен примерно $5 - 10 \text{ кВт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$, в то время как для барабанных сушилок он составляет на весь объем не более $0,5 \text{ кВт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Агрегаты с кипящим и виброкипящим слоями используют для сушки различных мелкозернистых продуктов, внутри которых на одной или нескольких ступенчатых решетках продукт высушивается в «кипящем» или «виброкипящем» состояниях.

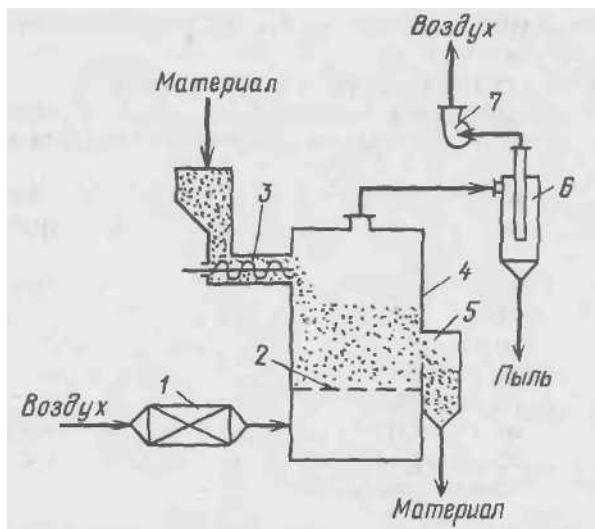


Рисунок 5.11 - Сушилка с одноступенчатым аппаратом кипящего слоя:

1 - калорифер; 2 - распределительная решетка;

- 3 -шнековый питатель; 4 -корпус сушилки;
- 5 -разгрузочное устройство;6 -циклон;
- 7 -вентилятор.

Для обеспечения равномерного кипения частиц продукта агент сушки подается на решетку равномерно и с соответствующей скоростью распределяется по всей площади. Сушка в виброкипящем слое характеризуется высокой интенсивностью, но сопряжена с повышенным расходом электроэнергии.

По гидродинамическому признаку агрегаты с кипящим слоем могут иметь прямоугольную или цилиндрическую формы, коническую форму с фонтанирующим или вихревым слоями, а также с локальным фонтанированием. По способу теплоподвода конструкции агрегатов можно разделить на агрегаты с подводом теплоты только с псевдоожижающим агентом, с перегретым распыливаемым раствором и кондуктивно - через теплообменник в слое.

Высушиваемый материал поступает из шнекового питателя 3 в слой материала, «кипящего» на газораспределительной решетке 2 в камере сушилки 4. Сушильный агент-воздух, подогреваемый в калорифере 1, проходит с заданной скоростью через отверстия распределительной решетки 2 и поддерживает на ней материал во взвешенном состоянии. Высушенный материал удаляют через разгрузочное устройство 5.

Отработанные газы очищают от образующейся пыли в циклоне 6.

В сушилках этого типа с цилиндрическим корпусом наблюдается значительная неравномерность сушки, обусловленная тем, что при интенсивном перемешивании в слое время пребывания отдельных частиц существенно отличается от его среднего значения. Поэтому применяют сушилки с расширяющимся кверху сечением, например конические. Скорость газа в нижней части камеры должна превышать скорость осаждения самых крупных частиц, а вверху - быть

меньше скорости осаждения самых мелких частиц. При такой форме камеры достигается более организованная циркуляция твердых частиц, которые поднимаются в центре и опускаются (в виде менее разреженной фазы) у периферии аппарата. Благодаря снижению скорости газов по мере их подъема улучшается распределение частиц по крупности и уменьшается унос пыли. Это, в свою очередь, повышает равномерность нагрева (более мелкие частицы, поднимающиеся выше, находятся в области более низких температур) и позволяет уменьшить высоту камеры.

На рисунке 5.12 представлена сушилка виброкипящего слоя А1-ОГК для сушки казеина.

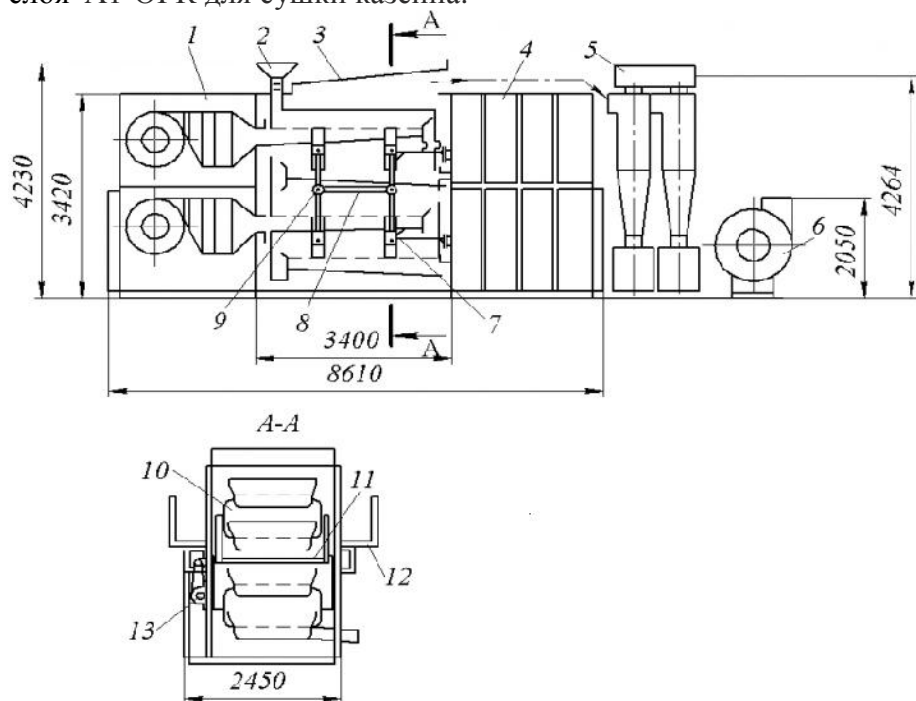


Рисунок 5.12 - сушилка виброкипящего слоя А1-ОГК для сушки казеина.

Сушилка А1-ОГК содержит сушильную камеру 3 с питателем 2 для подвода исходного сырья, калориферно-

вентиляционные станции первого и третьего коробов 1, второго и четвертого коробов 4, циклонную установку 5 и отсасывающий вентилятор 6. Вибропривод 8 сушильной установки расположен между вторым и третьим коробами сушилки.

Короба сушилки попарно крепятся между собой при помощи стяжек 10. Привод сушильной установки осуществляется от электродвигателя 13, соединенного ременной передачей с промежуточным валом, который при помощи конических передач соединен с двумя эксцентриковыми валами 11, расположенными перпендикулярно продольным осям коробов. Эксцентриковые валы снабжены маховиками, установлены в подшипниках и с помощью двух пар эксцентриков (сдвинутых по фазе на 180°), шатунов 9 и пальцев передают вибрацию парам коробов, соединенных с пластинчатыми и роликовыми направляющими 7, благодаря чему обеспечивается вертикальная вибрация. Обслуживающие площадки 12 в сушилке вынесены наружу, а стенки камеры приближены к стенкам коробов. Шатуны снабжены резинометаллическими шарнирами, что повышает надежность работы соединений.

Техническая характеристика сушилки А1-ОГК

Производительность, кг/ч:

- по высушенному казеину..... 200

- по испаренной влаге..... до 300

Площадь поверхности сит, м²..... 7,2

Амплитуда колебаний, мм..... 8

Частота колебаний, Гц..... 6

Температура агента сушки (при давлении 0,4 МПа), ... 110°С

Расход пара, кг/ч..... 950

Расход воздуха (максимальный), м³/ч..... 25000

Установленная мощность, кВт..... 35

Габаритные размеры,

мм..... 8260*2470*3980

Масса, кг..... 9500

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Машины и аппараты пищевых производств. В 3-х кн. : учебник для студ. вузов по спец. "Машины и аппараты пищевых произ-в" и "Пищевая инженерия". Кн.Т. 1 / С. Т. Антипов [и др.]; Минсельхозпрод, УО "БГАТУ"; под ред. В. А. Панфилова, В. Я. Груданова. - Минск: БГАТУ, 2008. - 580 с.
2. Теплотехническое оборудование В.М.Боровиков, А.А.Калютник, В.В.Сергеев - М: «Академия», 2011.
3. Романков П. Г., Фролов В. Ф. и др. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). - СПб: Химия, 1993. - 496 с.
4. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Часть 1. - М.:Химия, 1995 - 400 с.
5. Павлов К.Ф. и др. «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химических технологий».- Л: Химия, 1981 год - 560 с
6. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. - М.: Химия, 1970. - 429 с.
7. Павлов В.Ф., Павлов С.В. Основы проектирования тепловых установок.-- М.: «Высшая школа», 1987. - 212 с.
8. Сушильные установки / Г.К. Филоненко, П.Д. Лебедев . - М.: Госэнергоиздат, 1952. - 252 с

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – теплофизические характеристики некоторых пищевых продуктов

Продукт	Температура, t, °C	Удельная теплоемкость C, кДж/(кг · К)	Плотность, $\rho \cdot 10^3$ кг/м ³
Зерновые:			
- пшеница	10 - 35	1,22	1,42
- рожь	15 - 25	1,09	1,61
Какао тертое	10 - 70	2,64	1,11 – 1,08
Картофель:			
- свежий клубень	5 - 60	3,85	1,029
- высушенный	20 - 50	1,9 - 2,09	0,60 - 0,66
Кофе:			
- растворимый	15 - 45	1,538	1,47
- жареный в зернах	15 - 45	1,503	1,42
Макаронное тесто	10 - 50	1,84 - 1,88	1,25 - 1,32
Макаронны твердые	0 - 80	3,9	0,750
Масло какао	10 - 70	2,51	0,927 – 0,88
Кондитерские массы:			
- ирисная	25 - 85	2,24 - 2,31	1,4
- помадная	20 - 60	1,74	1,39
Мармелад жележный	25 - 85	2,95 - 2,79	1,411
Молоко:			
- цельное	15 - 60	3,90 - 3,85	1,029
- обезжиренное	15 - 60	3,95 - 4, 03	1,036
- сгущенное с сахаром	- 15	2,26 1,36	1,28 1,60
Сахар	15 - 85	3,20 - 3,41	1,198 - 1,160
Сахар инвертный	23 - 70	1,507	1,045
Сухари (ржаные)	-	3,94 - 4,02	0,99
Томаты:			

- свежие	20	1,354	1,44
- сушеные	15 - 22	3,76	0,919
Яблоки:			
- свежие	18	1,486	0,636
- сушеные			
Чай (черный байховый):			
- перед скручиванием	15 - 23	2,093	1,550
- высушенный	30	0,419	0,560

Таблица 2 - Физические свойства сухого воздуха
(при $p = 0,101$ МПа)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/кг}$	$\lambda \times 10^{-2}, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$\mu \times 10^{-6}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^{-6}, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	0,676

400	0,524	1,068	5,21	33,6	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	0,687

Таблица 3 - Физические свойства водяного пара в состоянии насыщения

t, °C	$p \cdot 10^{-5}$ Па	ρ , кг/ м ³	r , кДж/кг	c_p , кДж/кг К	$\lambda \times 10^{-2}$, Вт/(м· К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ м ² /с	Pr
0,01	0,0061	0,00485	2500	1,861	1,697	1888	1,00
10	0,0123	0,00939	2477	1,869	1,770	1011	1,00
20	0,0234	0,01729	2453	1,877	1,824	563,7	1,00
30	0,0424	0,03037	2430	1,885	1,883	328,9	1,00
40	0,0738	0,05117	12406	1,895	1,953	200,7	1,00
50	0,1233	0,08303	2382	1,907	2,034	127,5	0,99
60	0,1992	0,1302	2358	1,923	2,122	83,88	0,99
70	0,3116	0,1981	2333	1,942	2,214	56,90	0,99
80	0,4736	0,2932	2309	1,967	2,309	39,63	0,99
90	0,7011	0,4232	2283	1,997	2,407	28,26	0,99
100	1,013	0,598	2256,8	2,135	2,372	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2230,0	2,177	2,489	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2202,8	2,206	2,593	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2174,3	2,257	2,686	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2145,0	2,315	2,791	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2114,3	2,395	2,884	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2092,6	2,479	3,012	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2049,5	2,583	3,128	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2015,2	2,709	3,268	2,93	1,25
190	12,551	6,397	1978,8	2,856	3,419	2,44	1,30
200	15,55	7,862	1940,7	3,023	3,547	2,03	1,36
210	19,08	9,588	1900,5	3,199	3,722	1,71	1,41
220	23,20	11,62	1857,8	3,408	3,896	1,45	1,47
230	27,98	13,99	1813,0	3,634	4,094	1,24	1,54

240	33,48	16,76	1765,6	3,881	4,291	1,06	1,61
250	39,78	19,98	1715,8	4,158	4,512	0,913	1,68
260	46,94	23,72	1661,4	4,468	4,803	0,794	1,75
270	55,05	28,09	1604,4	4,815	5,106	0,688	1,82
280	64,19	33,19	1542,9	5,234	5,489	0,600	1,90
290	74,45	39,15	1476,3	5,694	5,827	0,526	2,01
300	85,92	46,21	1404,3	6,280	6,268	0,461	2,13
310	98,70	54,58	1325,2	7,118	6,838	0,403	2,29
320	112,90	64,72	1238,1	8,206	7,513	0,353	2,50
330	128,90	77,10	1139,7	9,881	8,257	0,310	2,86