

Министерство образования Республики Беларусь
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СУШКИ

Методическое пособие по дисциплине «Сушильные установки»
для студентов специальности 1-43 01 05 – Промышленная теплоэнергетика

Электронный учебный материал

Минск
БНТУ 2017

УДК 66.047(075.8)
ББК 35.114я7
С95

Автор:
В.А. Сычевский

Рецензент
А.Д. Чорный, заведующий лабораторией турбулентности
Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН
Беларуси

Теоретические основы сушки: методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» / В.А. Сычевский. – Минск: БНТУ, 2017. – 43 с.

Методическое пособие составлено в соответствии с программой курса «Сушильные установки» для энергетических специальностей ВУЗов. В нем изложены основные положения теории сушки. Приведена физико-математическая модель камерной конвективной сушки деформируемых коллоидных капиллярно-пористых материалов, которая предназначена для проведения численных расчетов сушильных установок.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 292-77-52 факс (017) 292-91-37
Регистрационный № БНТУ/ЭФ43-07.2017

© Учреждение образования
«БНТУ», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Виды сушимых материалов.....	5
Формы связи влаги с материалом.....	6
Изотермы сорбции и десорбции	9
Влажный воздух	12
Материальный баланс	13
Тепловой расчет.....	19
Идеальная сушилка	22
Реальная сушилка.....	23
Кинетика.....	25
Уравнение кинетики сушки.....	30
Время сушки	33
Деформирование.....	35
Система дифференциальных уравнений.....	37
Вычислительный эксперимент как база в компьютерных технологиях конструирования сушильных установок	44
Список использованных источников	46

Введение

Сушка присутствует в большом количестве современных технологий переработки коллоидных, капиллярно-пористых и коллоидных капиллярно-пористых материалов. Наиболее широкое применение сушка нашла в лесной, пищевой, строительной, горно-добывающей, медицинской, фармацевтической и сельско-хозяйственной промышленности. Сушат самые разнообразные материалы, к которым можно отнести жидкие, пастообразные, тонкодисперсные, сыпучие, порошковые, гранулированные, кусковые, капиллярные и пористые. Эти тела имеют самое разное происхождение: мука, макароны, хлеб, чай, овощи, фрукты, грибы, зерно, рыба, мясо, молоко, соки, яйца, специи, глина, торф, сапрпель, трава, древесина, керамические изделия, термоизоляция, штукатурка, биоматериалы, таблетки, лекарственные травы, растения, листья, цветы, семена, плазму крови, ферменты, синтетические химико-фармацевтические препараты, уголь, руда, калийная соль и т.д. Следует себе четко представлять, что это далеко не полный список, а лишь очень маленькая часть, но тем не менее дающий представление об объектах сушки.

Независимо от того является сушка самостоятельным производством или входит в состав более сложного, тем не менее она является технологическим процессом, состоящим из последовательности операций, необходимых для удаления воды из материала. В настоящее время технологий сушки настолько много, что их проблематично перечислить, уже не говоря о том, чтобы все проанализировать и описать в данном пособии.

Сформулируем наиболее общее определение процесса сушки влажных материалов. Сушкой называется процесс подвода тепловой энергии к материалу, испарение влаги с использованием тепловой энергии и последующее удаление образующихся паров из материала. Отметим, что в подавляющих случаях в качестве испаряемой и удаляемой жидкости является вода. Однако это могут быть и другие вещества, например, спирт или растворители. Нами будут рассматриваться только те процессы сушки, которые укладываются в данное

определение. Так, удаление влаги механическим способом под данное определение не подходит, поэтому сушкой не является.

Цели сушки могут быть самыми разными от простых, связанных с уменьшением затрат на транспортировку материала до очень сложных, связанных с улучшением или вовсе с изменением биологических, физико-химических или механических свойств материала. В общем случае цель сушки можно сформулировать следующим образом: превращение исходного сырья в промышленный материал с улучшенными биологическими, физико-химическими и механическими свойствами.

Виды сушимых материалов

Многообразие сушимых материалов с необходимостью требует изучения их свойств для правильного выбора сушильной установки и технологии сушки влажных тел. Все влажные материалы делятся на три вида: коллоидные, капиллярно-пористые и коллоидные капиллярно-пористые. Коллоидные материалы при удалении или впитывании жидкости сильно меняют размеры. При набухании способны удерживать большое количество воды. При обезвоживании сохраняют эластичные свойства. К таким телам относятся, например, желатин и мучное тесто. Капиллярно-пористые тела при удалении или добавлении воды почти не меняют размеры. Однако обезвоживание приводит к тому, что они становятся хрупкими и при значительных нагрузках в них образуются трещины либо происходит их полное разрушение. К таким материалам можно отнести, например, древесный уголь, влажный кварцевый песок, слабо обожженные керамические материалы. Коллоидные капиллярно-пористые материалы включают в себя свойства как коллоидных, так и капиллярно-пористых тел. Они обладают эластичными свойствами, что позволяет им сокращаться при обезвоживании и набухать при поглощении влаги, хотя и значительно меньше коллоидных тел. Одновременно с этим такие материалы при деформировании сохраняют свою внутреннюю структуру подобно капиллярно-пористым. Коллоидные капиллярно-пористые тела

относятся к наиболее распространенному классу материалов, которые подвергаются сушке. К ним можно отнести, например, торф, древесину, кожу, ткани, зерно, глину, почвы, пищевые продукты и многие другие материалы. Часто говоря о коллоидных капиллярно-пористых телах, будем под этим термином подразумевать и коллоидные, и капиллярно-пористые, и коллоидные капиллярно-пористые материалы.

Формы связи влаги с материалом

Большое значение в теории сушки коллоидных капиллярно-пористых объектов имеет вид связи поглощенной воды с веществом скелета тела. Это знание дает возможность глубже понять физику процессов переноса тепла и влаги и позволяет осмысленно выбрать сушильную установку и способ сушки. Классификация форм связи влаги с материалом строится на основе величины энергии связи. Все формы связи делятся на химическую, физико-химическую и физико-механическую.

Химическая связь воды и материала характеризуется точными количественными соотношениями (стехиометрическими соотношениями). Она имеет ионную или молекулярную природу. Причинами, обуславливающими данную форму связи, являются основная и побочная валентности атомов, где под валентностью понимается число электронных пар, которыми данный атом связан с другими атомами. Создается такая связь в результате химических реакций или кристаллизации из раствора с образованием кристаллогидратов. Вследствие химических реакций образуется новое вещество в состав которого входит вода. При образовании кристаллогидратов вода входит в структуру кристалла, а тело сильно меняет свои свойства. Химически связанная вода имеет большую величину энергии связи с веществом и не выводится из материала при его нагревании вплоть до 150 °С. Она может быть удалена при химическом взаимодействии с некоторым веществом или при прокаливании. В процессе сушки такая вода из тела не удаляется.

Физико-химическая связь между влагой и материалом образуется в различных не строго определенных соотношениях в отличие от химической. Физико-химическая связь разделяется на адсорбционную и осмотическую. Образование адсорбционной связи обусловлено растворением составляющих материал элементов в воде, образованием сольватных оболочек и адсорбционных молекулярных слоев влаги на внешних и внутренних поверхностях материала. Условием образования осмотической связи является наличие водорастворимых веществ и избирательной диффузия их через полупроницаемые оболочки. Физической причиной, приводящей к образованию адсорбционной связи, является молекулярное силовое поле, а причиной образования осмотической связи служит осмотическое давление. Адсорбционно-связанная влага имеет среднюю величину энергии связи, а осмотическая влага характеризуется слабой величиной энергии. Физико-химическая связь может быть как обратимой, так и необратимой.

Наличие физико-химической связи при контакте воды с материалом приводит к различным эффектам. Так при помещении тела в воду оно может диспергироваться до ионов и молекул в результате того, что силы сольватации оказываются больше сил между частицами вещества. Вода, входящая в сольватные оболочки, не меняет своих свойств. В результате такого взаимодействия воды и материала образуется истинный раствор. В другом случае, взаимодействие воды и материала приводит к тому, что тело пластифицируется и набухает вследствие проникновения влаги внутрь скелета материала. Для некоторых тел набухание продолжается до образования коллоидных растворов, а вода при этом меняет свои свойства. В третьем случае, на поверхности материала образуется мономолекулярный слой из молекул воды, связанный с материалом наиболее сильно и поэтому сильнее всего отличается от свойств свободной воды. На первый слой воды ложатся следующие слои образуя полимолекулярный адсорбционный слой, который может содержать десятки и сотни мономолекулярных слоев. Каждый выше лежащий слой слабее связан с поверхностью материала, а вода в них все ближе по свойствам к свободной воде.

И, наконец, осмотическое давление приводит к набуханию растительных клеток, содержащих концентрированный раствор, внутрь которых вода проникает из менее концентрированного раствора внешней среды. Удаление физико-химически связанной влаги из материала возможно путем испарения, десорбции, или обезвоживания при создании более высокой концентрации водорастворимых веществ вне клетки.

Физико-механическая связь между влагой и материалом, как и в предыдущем случае, образуется в различных не строго определенных соотношениях. Физико-механическую связь можно разделить на несколько видов: структурную, микрокапиллярную, макрокапиллярную и смачивания. Структурная связь образуется при формировании структуры материала, когда вода механически удерживается в замкнутых полостях. Удалить такую влагу можно испарением, механическим отжатием или разрушением структуры материала. Микрокапиллярная и макрокапиллярная влага образуется в результате поглощения воды из влажного воздуха или путем непосредственного соприкосновения капилляров с водой. Вода удерживается в капиллярах за счет давления созданного кривизной поверхности жидкости. Удалить ее можно из материала путем испарения либо при приложении внешнего давления большего, чем капиллярное. Основная масса удерживаемой воды в капилляре является свободной и поэтому сохраняет свойства свободной воды. Меняет свои свойства лишь вода, находящаяся непосредственно у поверхности капилляров и связанная со стенками адсорбционно. Однако количество адсорбционной воды в капилляре значительно меньше по сравнению со свободной, поэтому ее влиянием на свойства воды часто пренебрегают. Капилляры с радиусом меньшим 10^{-7} м называются микрокапиллярами, а капилляры с радиусом большим 10^{-7} м – макрокапиллярами. И, наконец, смачивание осуществляется обычным прилипанием воды при непосредственном контакте ее с непористой плоской поверхностью тела за счет поверхностного натяжения при угле смачивания более 90° . Также как и капиллярная такая вода является свободной и сохраняет свои свойства. Лишь слой воды у самой поверхности связан адсорбцией и,

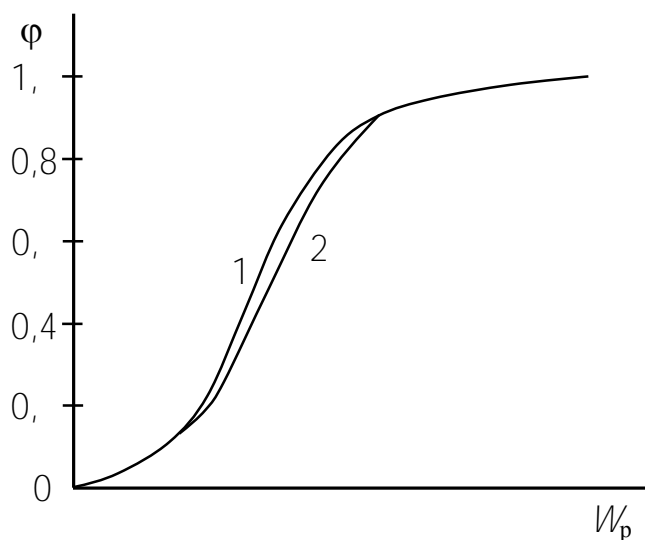
поэтому, меняет свойства. Удаление такой влаги можно осуществить как механическим способом, так и испарением. Физико-механическая связь воды с материалом гораздо слабее химической и физико-химической.

Подчеркнем, что физико-химически и физико-механически связанную влагу можно удалить путем сушки влажных материалов. В подавляющих случаях сушка коллоидных капиллярно-пористых материалов является единственно возможным и приемлемым способом их обезвоживания.

Изотермы сорбции и десорбции

Влияние поверхности скелета материала на поглощенную влагу приводит к тому, что свойства пара над поверхностью тела несколько отличаются от свойств пара над поверхностью свободной воды. Для понимания проблем связывания воды с коллоидным капиллярно-пористым телом необходимо проводить исследование равновесного состояния тела с окружающим его влажным воздухом. Перемещение влаги между сушильным агентом и материалом осуществляется за счет разности парциальных давлений пара воды в материале P_m и в воздухе P_n . При $P_m > P_n$ вода удаляется из материала. Когда же $P_m < P_n$ материал поглощает воду. В состоянии термодинамического равновесия материала с окружающим его воздухом равны как температуры тела и воздуха, так и парциальные давления $P_m = P_n$. Равенство парциальных давлений означает, что обмен водой между коллоидным капиллярно-пористым телом и сушильным агентом не происходит, а, следовательно, материал приобретает некоторое постоянное значение влагосодержания, которое называется равновесным влагосодержанием или равновесной влажностью. Ее величина зависит от способа перехода в равновесное состояние. Так если при установлении равновесного состояния тело теряет воду, то равновесие достигается путем десорбции или сушки. Когда материал переходит в равновесное состояние поглощая влагу, то равновесное состояние наступает за счет сорбции или увлажнения. В равновесном состоянии каждому значению равновесного влагосодержания W_p отвечает некоторое значение влажности воздуха φ . Поэтому

между этими величинами существует функциональная зависимость. При неизменной температуре эта зависимость называется изотермой сорбции, если она определяется в процессе сорбции влаги материалом, и изотермой десорбции, если находится в процессе десорбции воды. Типичные кривые сорбции и десорбции представлены на рисунке 1. Из рисунка видно, что изотермы сорбции и десорбции различаются между собой. Это несовпадение изотерм называется сорбционным гистерезисом. Равновесное влагосодержание материала,



1 – изотерма сорбции; 2 – изотерма десорбции

Рисунок 1. Типичные кривые сорбции и десорбции.

соответствующее относительной влажности воздуха $\varphi=1$, называется максимальным гигроскопическим влагосодержанием. Гигроскопическая влага адсорбируется материалом из воздуха и может впитываться при соприкосновении с водой. Поглощение же влаги сверх максимального гигроскопического влагосодержания возможно лишь при непосредственном контакте с влагой.

Ниже приводятся некоторые приближенные эмпирические уравнения изотерм сорбции и десорбции. Поснов Б.А. предложил следующую зависимость между равновесным влагосодержанием W_p и относительной влажностью φ :

$$\frac{1}{W_p} = \frac{1}{W_c} + B \ln \phi,$$

где W_c – максимальное гигроскопическое влагосодержание, выраженное в процентах, B – коэффициент, зависящий от температуры.

Лыков А.В. предлагает равновесное влагосодержание вычислять эмпирической формулой:

$$W_p = \frac{a\phi}{b-\phi},$$

где a и b – постоянные коэффициенты, зависящие от температуры и свойств материала.

Миниович Я.М. установил следующую формулу:

$$\lg W_p = A\phi + \lg(B + CT),$$

где T – температура материала, A , B и C – постоянные, зависящие от свойств материала.

Родэ А.А. получил уравнения для равновесного влагосодержания в виде:

$$W_p = A\phi^{0,5} \text{ при } 0 < \phi < 0,35,$$

$$W_p = A_0 + B\phi^2 \text{ при } 0,35 < \phi < 0,94,$$

где A , A_0 и B – постоянные коэффициенты, зависящие от материала.

Шубин Г.С. предлагает следующее выражение для древесины:

$$W_p = 10.6^\phi (0.0327 - 0.00015T),$$

Влажный воздух

В качестве сушильного агента чаще всего используется влажный воздух, который представляется как бинарная смесь, состоящая из сухого воздуха и водяного пара. Причем сухой воздух описывается как однородный газ с эффективной молярной массой $M=29$ г/моль. Известно, что водяной пар в воздухе может находиться либо в перегретом, либо в насыщенном состоянии. Поэтому, смесь, состоящая из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называется ненасыщенным влажным воздухом. Такой сушильный агент поглощает влагу и используется в сушильных установках. Тогда, смесь, состоящая из сухого воздуха и насыщенного водяного пара, называется насыщенным влажным воздухом. Добавление воды к нему приведет к конденсации и образованию жидкой фазы. В большом спектре технических задач влажный воздух с хорошей точностью можно описать уравнением идеального газа. При расчете сушильных установок основными параметрами влажного воздуха являются относительная влажность φ , влагосодержание x , температура T и энтальпия h . Относительная влажность воздуха φ равна отношению парциального давления пара $P_{п}$ в воздухе к давлению насыщенного пара $P_{н}$ при данной температуре

$$\varphi = \frac{P_{п}}{P_{н}}$$

Она характеризует способность воздуха насыщаться влагой. Из формулы для φ видно, чем меньше φ , тем больше влаги может поглотить воздух, а следовательно, выше сушильная способность воздуха. Величина $P_{н}$ зависит от температуры воздуха T . Она увеличивается с повышением T , поэтому φ при постоянном влагосодержании воздуха падает. На практике это приводит к тому, что при нагревании воздуха его сушильная способность увеличивается. Перед

тем как сушить материал в конвективных сушильных установках воздух всегда нагревают в калориферах.

Влагосодержанием воздуха x называется отношение массы водяного пара $m_{\text{п}}$, содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха $m_{\text{св}}$ $x = m_{\text{п}}/m_{\text{св}}$. Можно показать, что при заданном барометрическом давлении B влагосодержание x является функцией только парциального давления:

$$x = 0,622 \frac{P_{\text{п}}}{B - P_{\text{п}}} = 0,622 \frac{\varphi P_{\text{п}}}{B - \varphi P_{\text{п}}}. \quad (1)$$

Формула (1) показывает, что влагосодержание влажного воздуха можно определить по парциальному давлению пара, и, наоборот, по x однозначно находится $P_{\text{п}}$.

Под энтальпией понимается количество тепла подведенное к влажному воздуху при постоянном давлении и нагревании его от 0 °С до некоторой определенной температуры. Энтальпия влажного воздуха состоит из энергии, используемой для нагревания сухого воздуха и воды, теплоты испарения воды и энергии, затраченной на нагревание водяного пара. С учетом этого выражение для энтальпии имеет следующий вид:

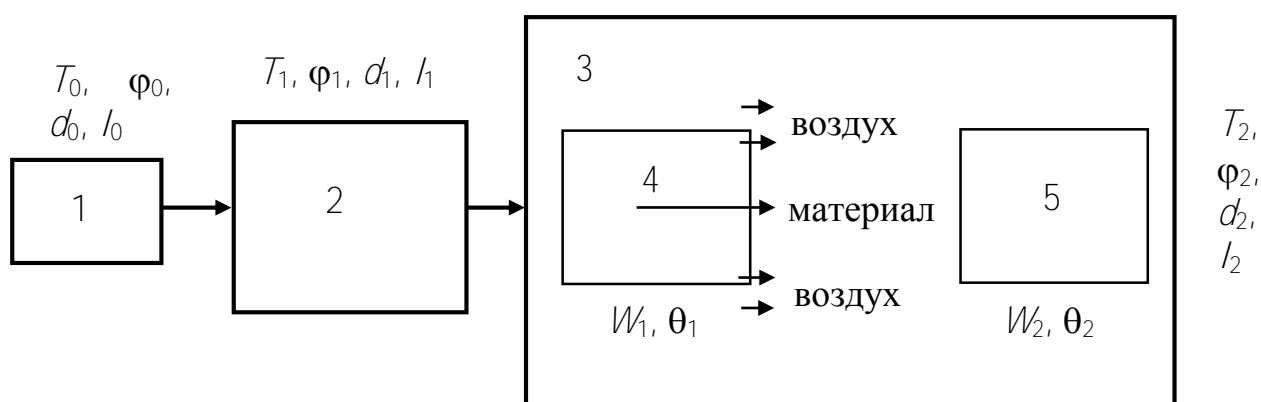
$$I = (c_{\text{св}} + c_{\text{п}} x) T + r x = (1010 + 1970 x) T + 2493000 x. \quad (2)$$

На формулах (1) и (2) построена известная диаграмма влажного воздуха Рамзина Л.К., которая позволяет наглядно представить сушильные процессы и быстро найти недостающие параметры изучаемой системы.

Материальный баланс

Общую схему процесса сушки в конвективной сушильной установке, показанную на рисунке 2, можно представить следующим образом. Наружный

воздух с параметрами T_0 (температура), φ_0 (влажность), d_0 (влажностное содержание) и l_0 (энтальпия) нагнетается вентилятором в калорифер, в котором нагревается и с параметрами T_1 , φ_1 , d_1 и l_1 входит в сушильную камеру. В процессе сушки материала параметры воздуха изменяются и достигают значений T_2 , φ_2 , d_2 и l_2 . С этими параметрами воздух выводится из сушильной камеры. Состояние материала перед сушилкой характеризуется параметрами W_1 (начальное влажностное содержание) и θ_1 (начальная температура), а после сушилки параметрами W_2 (конечное влажностное содержание) и θ_2 (конечная температура).



1 – вентилятор, 2 – калорифер, 3 – сушильная камера, 4 – материал на входе в камеру,
5 – материал на выходе из камеры

Рисунок 2. Общая схема процесса сушки

К числу основных определяемых материальных потоков относятся количество удаляемой в единицу времени влаги U и расход воздуха L . Согласно закону сохранения вещества масса влажного материала G_1 , входящего в сушильную камеру в единицу времени, должна быть равна массе высушенного материала G_2 , выходящего из камеры в единицу времени, плюс масса испаренной влаги U (материальный баланс по влажному материалу). Тогда:

$$G_1 = G_2 + U. \quad (3)$$

Так как в процессе сушки масса абсолютно сухого вещества остается постоянной, то напишем уравнения:

$$G_1 = \frac{G_c}{\left(1 - \frac{W_1}{100}\right)},$$

$$G_2 = \frac{G_c}{\left(1 - \frac{W_2}{100}\right)}.$$

Здесь G_c – масса абсолютно сухого вещества, W_1 – начальное влагосодержание, отнесенное к общей массе материала и выраженное в процентах, W_2 – конечное влагосодержание, отнесенное к общей массе материала и выраженное в процентах.

Из этих уравнений определяется масса высушенного материала на основе массы сырого:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2},$$

или, наоборот, находим массу начального материала до сушки по его массе после сушки:

$$G_1 = G_2 \frac{100 - W_2}{100 - W_1}.$$

Из основного уравнения (3) и соотношений (1) и (2) получим массу испаренной влаги в виде:

$$U = G_1 \frac{(W_1 - W_2)}{(100 - W_2)} = G_2 \frac{(W_1 - W_2)}{(100 - W_1)}. \quad (4)$$

В случае задания величин влагосодержаний W_1 и W_2 в долях, выражение (4) примет вид

$$U = G_1 \frac{(W_1 - W_2)}{(1 - W_2)} = G_2 \frac{(W_1 - W_2)}{(1 - W_1)}.$$

Когда же влагосодержания W_1 и W_2 рассчитаны к массе сухого вещества в долях, тогда получим:

$$U = G_1 \frac{(W_1 - W_2)}{(1 + W_1)} = G_2 \frac{(W_1 - W_2)}{(1 + W_2)}.$$

Найти количество удаляемой влаги можно также зная массу сухого материала G_c . В этом случае материальный баланс по влаге в твердом теле представим в виде:

$$G_c W_1 - U - G_c W_2 = 0.$$

Здесь W_1 и W_2 отнесены к массе сухого вещества и выражены в долях.

Тогда поток удаляемой влаги находим по формуле:

$$U = G_c (W_1 - W_2).$$

В процессе сушки влагосодержание сушильного агента повышается в результате увеличения массы водяного пара в паровоздушной смеси. В тоже время, как показывают практические наблюдения, масса сухого воздуха

меняется незначительно. Поэтому считают, что в процессе сушки масса сухого воздуха L (в кг/ч) остается постоянной и все величины, характеризующие состояние сушильного агента, относят к 1 кг абсолютно сухого воздуха, содержащегося в паровоздушной смеси.

Уравнение баланса влаги для сушильной камеры при установившемся процессе сушки выражает равенство массы влаги, поступившей в камеру с материалом и воздухом, и влаги, уходящей из камеры с материалом и воздухом (материальный баланс по сушильному агенту):

$$\frac{G_1 W_1}{100} + \frac{L d_1}{1000} = \frac{G_2 W_2}{100} + \frac{L d_2}{1000},$$

где $\frac{G_1 W_1}{100}$ – масса влаги, поступившей с материалом в сушильную камеру; $\frac{G_2 W_2}{100}$

– масса влаги, уходящей с материалом; $\frac{L d_1}{1000}$ – масса влаги поступившей с

воздухом; $\frac{L d_2}{1000}$ – масса влаги удаленной с воздухом; d – влагосодержание

воздуха выраженное в граммах на один килограмм сухого воздуха;

Из этого уравнения следует:

$$\frac{G_1 W_1}{100} - \frac{G_2 W_2}{100} = \frac{L(d_2 - d_1)}{1000}.$$

Разность слева в уравнении (20) – это количество испаренной влаги U в час. Поэтому U находим по следующей формуле:

$$U = L \frac{d_2 - d_1}{1000}.$$

Следовательно, массу сухого воздуха L найдем из выражения:

$$L = U \frac{1000}{d_2 - d_1}.$$

Введем удельный расход воздуха l на 1 кг испаренной воды по формуле:

$$l = \frac{L}{U}.$$

Тогда:

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

Вместо величины d , имеющей размерность г/кг, также используют величину χ , имеющую размерность кг/кг, тогда числовые значения χ и d соотносятся между собой следующим образом $d=1000\chi$. Выражения для L и l примут вид:

$$L = U \frac{1}{\chi_2 - \chi_1},$$

$$l = \frac{1}{\chi_2 - \chi_1}.$$

Так как при прохождении воздуха через калорифер его влагосодержание остается постоянным $\chi=\text{const}$, т.е. $\chi_1=\chi_0$, то можно написать

$$l = \frac{1}{\chi_2 - \chi_0}.$$

Это уравнение является основным для определения расхода воздуха в сушильной установке. Из него видно, что расход повышается с увеличением χ_0 . Так как влагосодержание наружного воздуха χ_0 в летнее время больше, чем в зимнее, то при $\chi_2 = \text{const}$ вентиляторы рассчитывают для летних условий работы сушилки. Вентиляционное устройство рассчитывают обычно по объемному количеству перемещаемого воздуха. Зная расход воздуха по массе сухого воздуха L , можно определить расход воздуха по объему реального влажного воздуха $V_{\text{вл.в}}$ (м³/ч), пользуясь формулой

$$V_{\text{вл.в}} = L \nu_0,$$

где ν_0 – удельный объем влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого воздуха.

Тепловой расчет

Чтобы рассчитать расход теплоты в сушильной установке, составляют уравнение теплового баланса для установившегося процесса, которое представляет собой равенство между количеством теплоты поступающим в устройство, и количеством теплоты, уходящим из него. Сначала рассмотрим тепловые потоки в калорифере. Расход теплоты на сушку находится из теплового баланса для сушильного агента:

$$L l_0 + Q_k - L l_1 = 0.$$

Здесь $L l_0$ – количество теплоты поступающее в калорифер с воздухом из окружающей среды; $L l_1$ – количество теплоты поступающее в сушильную камеру с нагретым воздухом; Q_k – теплота выделяемая калорифером.

Тогда поток теплоты, расходуемый на сушку, находится из формулы:

$$Q_k = L(l_1 - l_0).$$

Удельный расход теплоты q_k , приходящийся на 1 кг удаляемой влаги, рассчитаем по формуле:

$$q_k = l(l_1 - l_0).$$

Разберём теперь основные тепловые потоки в сушильной камере. Количество теплоты, поступающей в камеру: Ll_1 – количество теплоты, поступающей в сушильную камеру с сушильным агентом; $G_2c\theta_1$ – количество теплоты, поступающей в сушильную камеру с высушиваемым материалом; $Wc_{в}\theta_1$ – количество теплоты, поступающей в сушильную камеру с влагой, испаряемой из материала; $Q_{д}$ – дополнительная теплота, подводимая непосредственно в сушильную камеру. Количество теплоты, уходящей из камеры: Ll_2 – количество теплоты, выходящей из сушильной камеры с влажным воздухом; $G_2c\theta_2$ – количество теплоты, выходящей из сушильной камеры с высушенным материалом; Q_0 – потери теплоты в окружающую среду; $Q_{тр}$ – потери теплоты с транспортными приспособлениями.

Уравнение теплового баланса для сушильной камеры представляет собой равенство между количеством теплоты, поступающим в камеру, и количеством теплоты, уходящим из нее. Исходя из этого тепловой баланс для сушильной камеры имеет вид:

$$Ll_1 + G_2c\theta_1 + Wc_{в}\theta_1 + Q_{д} = Ll_2 + G_2c\theta_2 + Q_0 + Q_{тр}. \quad (5)$$

Производя преобразования уравнения (5), получим:

$$L(l_2 - l_1) = Q_{д} + Wc_{в}\theta_1 - Q_0 - Q_{тр}, \quad (6)$$

где $Q_m = G_2 c(\theta_2 - \theta_1)$ – потери тепла на нагревание высушенного материала.

Разделив (6) на U получим уравнение, где фигурируют величины, отнесенные к 1 кг удаляемой влаги:

$$l(l_2 - l_1) = q_d + c_b \theta_1 - q_m - q_o - q_{тр}. \quad (7)$$

Выражение, стоящее справа от знака равенства в формуле (7), называют параметром сушки и обозначают символом Δ :

$$\Delta = q_d + c_b \theta_1 - q_m - q_o - q_{тр}. \quad (8)$$

Окончательно уравнение для изменения энтальпии в сушильной камере примет вид:

$$l(l_2 - l_1) = \Delta, \quad (9)$$

или

$$l_2 - l_1 = \Delta(x_2 - x_1). \quad (10)$$

Уравнения (9) или (10) являются основной формой теплового баланса конвективной сушилки. Из выражений (8) – (10) следует, что возможны несколько способов протекания процесса:

– при $\Delta > 0$ подвод теплоты в сушильной камере с избытком компенсирует теплотери в ней. Процесс сушки в этом случае идет с повышением энтальпии $l_2 > l_1$;

– при $\Delta < 0$ подвод теплоты в сушильной камере недостаточен для компенсации теплотерь. Тогда процесс сушки идет с понижением энтальпии $l_2 < l_1$;

– при $\Delta=0$ отдельные теплотери в сушильной камере компенсируют друг друга и поэтому $l_2 = l_1$.

Идеальная сушилка

Выражение $\Delta=0$ верно также и тогда, когда каждая составляющая параметра сушки в формуле (8) равна нулю. В этом случае проходящий процесс называется идеальным или теоретическим, а сушилка, в которой совершается такой процесс, называется идеальной или теоретической. Условие $\Delta=0$ в таком случае означает, что теплота, отдаваемая сушильным агентом, затрачивается только на испарение влаги из материала. Учитывая формулу (10) запишем для идеальной сушилки

$$l_2 = l_1 \text{ или } l = \text{const}.$$

Это значит, что процесс сушки в идеальной сушильной камере идет по линии постоянной энтальпии. Объяснение этого факта состоит в следующем. Сушильный агент отдает свою теплоту, что сопровождается снижением l , но она идет исключительно на испарение влаги, которая в виде паров поглощается сушильным агентом и возвращает тем самым ему затраченную теплоту. В результате чего энтальпия остается постоянной. На рисунке 3, используя $l-x$ диаграмму, отображен идеальный процесс сушки.

Воздух из окружающей среды с начальными параметрами, отмеченными индексом 0, находится в точке 0. Затем он при постоянном влагосодержании $x=\text{const}$ нагревается в калорифере до состояния с параметрами, обозначенными индексом 1. При этом на диаграмме из точки 0 перемещаемся вертикально вверх в точку 1. Далее нагретый воздух из калорифера попадает в сушильную камеру, где нагревает материал и поглощает влагу. Это приводит к тому, что параметры сушильного агента меняются и принимают значения, отмеченные индексом 2. Эти изменения воздуха совершаются на диаграмме вдоль прямой из точки 1 в точку 2 с постоянным значением энтальпии $l=\text{const}$.

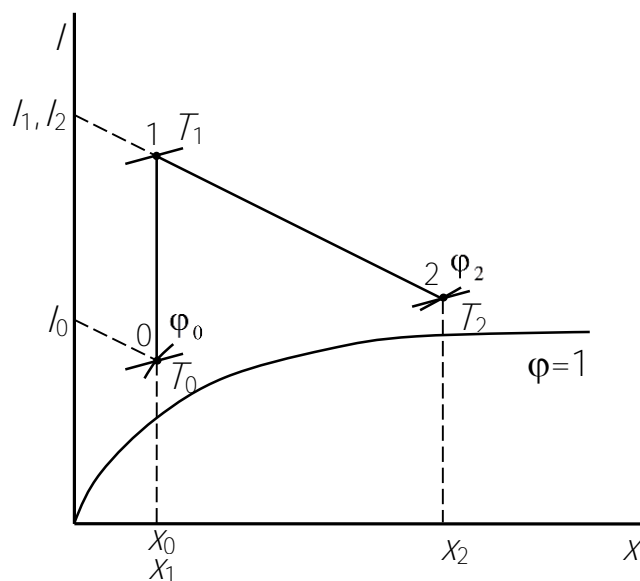


Рисунок 3. Типичная $l-x$ диаграмма для простой идеальной сушиллки

Реальная сушиллка

Теперь рассмотрим простую реальную сушиллку для которой $\Delta \neq 0$. Примем, что нам известны параметры сушильного агента в точках 0 и 1 при неизвестных в точке 2. Типичная диаграмма для такой сушиллки показана на рисунке 4. При определении точки 2 следует иметь в виду, что она лежит на линии φ_2 . Так как состояние 2 неизвестно, то уравнение для процесса в сушильной камере, пользуясь уравнением (10), можно написать в виде:

$$l - l_1 = \Delta(x - x_1) \quad (11)$$

Из (11) видно, что прямая проходит через точку 1. Для нахождения точки 2 следует задаться произвольным значением $x > x_1$ и рассчитать по формуле (11) соответствующее ему значение l . Так как этому же уравнению удовлетворяет и точка 2, и линия φ_2 , то, проводя прямую через точки (l_1, x_1) и (l, x) , отыскиваем 2 на пересечении этой прямой и линии φ_2 . Точка 2 определена и расчет на этом закончен. В случае $\Delta > 0$ компенсация тепловых потерь происходит за счет подвода дополнительной теплоты q_d в сушильную камеру, поэтому точка 2

лежит правее точки $2^{ид}$ идеального процесса, как это видно из рисунка 4. Когда же $\Delta < 0$ тепловые потери не компенсируются за счет q_d , поэтому точка 2 лежит левее точки $2^{ид}$ идеального процесса.

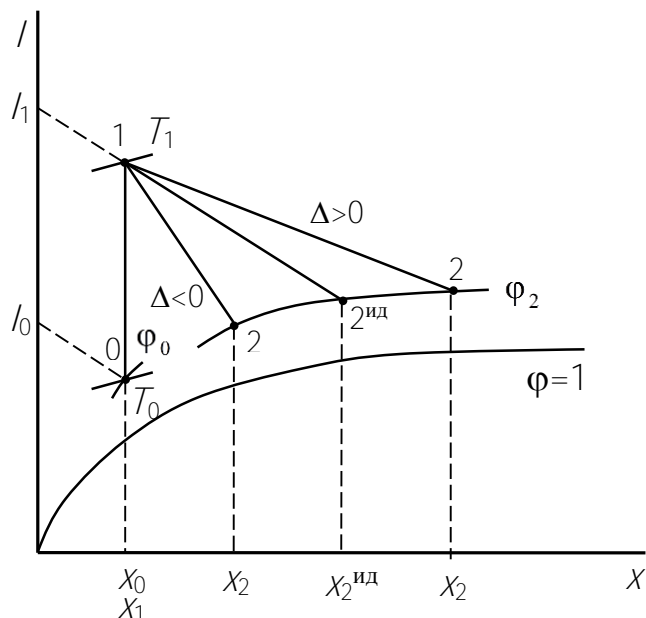


Рисунок 4. Типичная $t-x$ диаграмма для простой реальной сушильной установки при неизвестном состоянии воздуха на выходе из нее (в точке 2)

Рассмотрим теперь реальную (действительную) сушилку при известных параметрах в точках 0 и 2 и неизвестных в точке 1, как показано на рисунке 5. Тогда в уравнении (10) в качестве фиксированных следует принять параметры t_2 и x_2 , отвечающие заданной точке 2, а значения t_1 и x_1 заменить переменными. Выражение (10) переходит в линейное уравнение:

Линию $t = t(x)$ здесь можно построить, задавшись произвольным значением x (лучше $x < x_2$), рассчитав по формуле (10) сопряженное с этим x значение t и зафиксировав на диаграмме промежуточную точку (t, x) . Линия, проведенная через эту точку из точки 2 до пересечения с вертикалью $x_0 = x_1$, будет линией реального процесса, а точка пересечения есть точка 1. Данное построение аналогично построению, которое применялось выше при нахождении неизвестной точки 2.

$$l_2 - l = \Delta(x_2 - x)$$

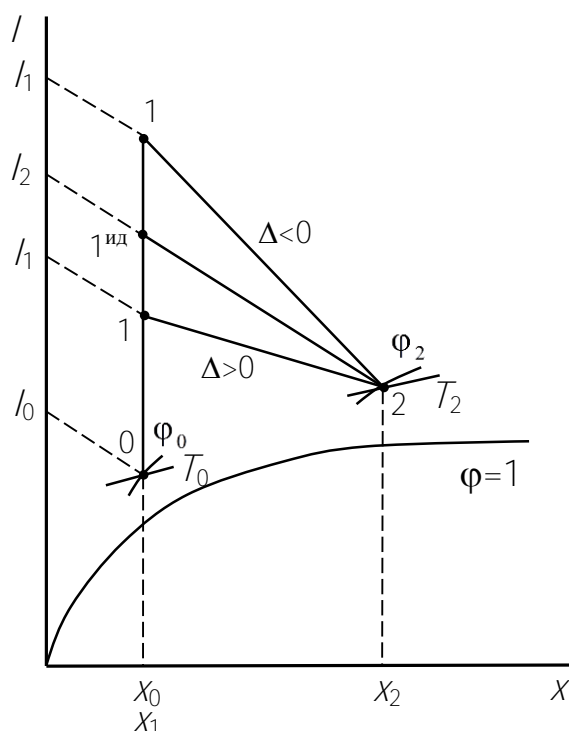


Рисунок 5. Типичная $l-x$ диаграмма для простой реальной сушильной установки при неизвестном состоянии воздуха на входе в нее

Кинетика

Кинетикой сушки называется зависимость среднего влагосодержания и средней температуры тела от времени. Владение кинетикой сушки необходимо в первую очередь для решения практических задач. Предметом ее исследования являются проблемы скорости и продолжительности высушивания влажных материалов. Кинетика сушки влажных материалов исследуется экспериментально, путем нахождения кривой сушки $\bar{W} = f(t)$ и кривой нагрева $\bar{T} = g(t)$. В общем случае эти кривые состоят из нескольких участков, соответствующих различным периодам сушки. При этом основная доля подведенного тепла расходуется на испарение влаги и некоторая ее часть

тратится на нагрев материала, а при сушке до малых значений влагосодержания энергия также уходит на разрыв адсорбционной связи.

Рассмотрим наиболее простой случай сушки влажного материала нагретым воздухом с постоянными параметрами, т. е. с постоянными температурой воздуха T_c , его относительной влажностью φ и скоростью движения v . На рисунке 6 представлены типичные кривые изменения средних влажности и температуры материала во времени.

В начале сушки на участке АВ происходит прогрев материала до температуры мокрого термометра $T_{м.т}$ и небольшое уменьшение влажности. Этот этап часто называется стадией прогрева материала. Обычно, стадия прогрева материала имеет небольшую продолжительность. Далее влага из материала удаляется равномерно во времени, т. е. с постоянной скоростью. Влагосодержание материала уменьшается по линейному закону на участке ВС, при этом температура материала постоянна и равна температуре мокрого термометра. Данный этап называют периодом постоянной скорости сушки (или первым периодом). Конечной точке С соответствует критическое значение влагосодержания $W_{кр}$.

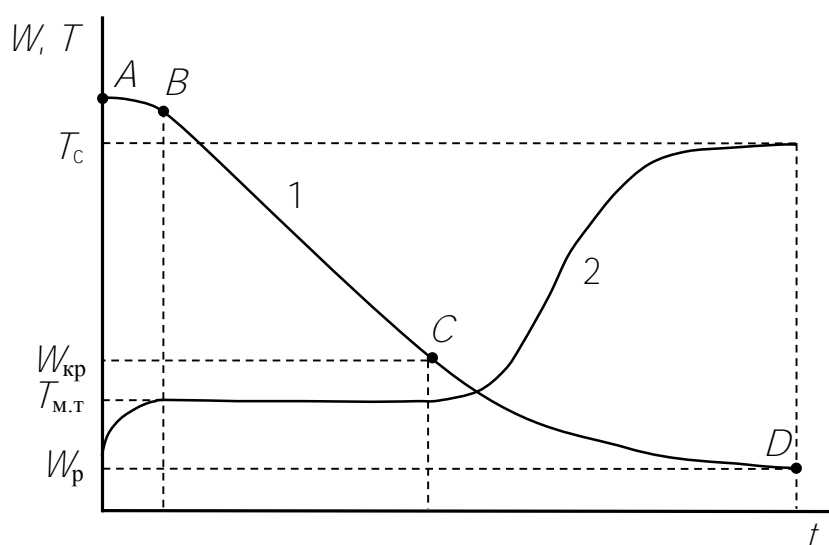


Рисунок 6. Типичные кривая сушки (1) и кривая нагрева (2) высушиваемого материала

Эксперимент и анализ явлений показывает, что в первый период скорость удаления влаги из материала такая же, как и испарение свободной воды с поверхности большого сосуда, расположенной далеко от его стенок. Это означает, что в первый период удаляется свободная влага, не связанная со скелетом материала. На этом участке кривые сушки в одинаковых условиях совпадают для разных материалов.

Далее влага удаляется медленнее по нелинейной кривой CD , приближаясь к равновесному влагосодержанию W_p . Температура на этом этапе быстро растет. Достижение равновесной влажности означает установление динамического равновесия, когда скорости испарения и конденсации равны, а температура материала становится равной температуре среды T_c . Данный этап называется периодом падающей скорости сушки (второй период сушки). Во втором периоде удаляется связанная влага. Форма кривой сушки для этого периода зависит от природы материала.

Кривая сушки позволяет сразу ответить на вопрос, каким должно быть время пребывания материала в установке для того, чтобы влажность понизилась от начального значения до некоторого конечного, а кривая нагрева дает возможность определить конечную температуру материала и рассчитать количества тепла, идущего на его нагревание.

В место кривых сушки часто используют кривые скорости сушки. Типичный график кривой скорости сушки представлен на рисунке 7. Под скоростью сушки понимают изменение влагосодержания в единицу времени $d\bar{W}/dt$, она численно равна тангенсу угла наклона касательной к кривой сушки $\bar{W} = f(t)$. Методом графического дифференцирования кривой сушки получают значения скорости сушки $d\bar{W}/dt$ для разных значений влагосодержания, затем строится график $d\bar{W}/dt = h(\bar{W})$, который и называют кривой скорости сушки.

На кривой скорости сушки отмечают те же периоды, что и на кривых сушки и нагрева материала. Однако в процессе сушки влагосодержание

материала уменьшается, поэтому при анализе графиков их необходимо читать в обратном направлении. Так на рисунке 7 отрезок АВ соответствует периоду прогрева материала. За этот период температура материала повышается до температуры мокрого термометра, а его влажность снижается незначительно от начального значения W_n . Скорость сушки возрастает и к концу периода прогрева достигает максимальной величины. Период постоянной скорости сушки отображается прямой ВС, которой отвечает постоянная скорость изменения влагосодержания материала. На этом этапе происходит интенсивное испарение свободной влаги в материале, скорость процесса является наибольшей и определяется внешнедиффузионным сопротивлением, так как внутридиффузионное сопротивление незначительно.

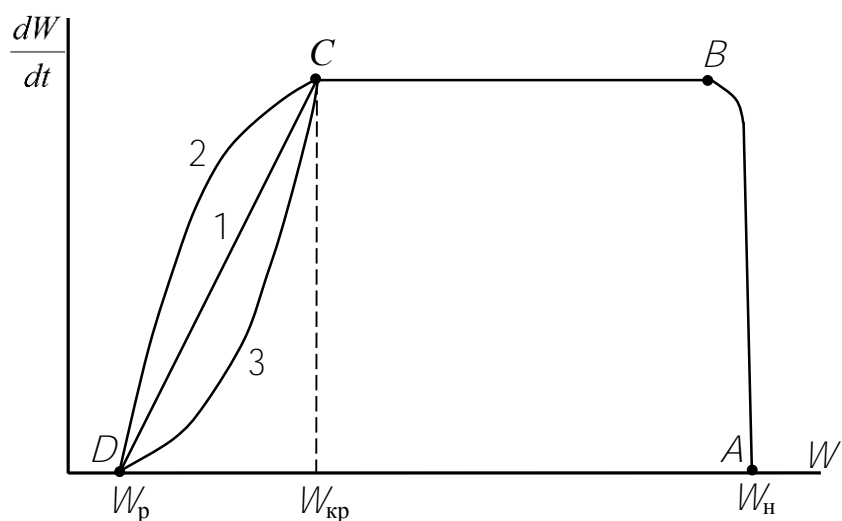


Рисунок 7. Типичная кривая скорости сушки влажных материалов

Периоду падающей скорости сушки соответствует одна из линий между точками С и D. Точка С отвечает критическому значению влагосодержания $W_{кр}$. От точки С скорость сушки начинает уменьшаться. Это обусловлено следующими причинами. С уменьшением влагосодержания материала внутридиффузионное сопротивление увеличивается, поэтому общее сопротивление диффузии возрастает, и скорость сушки падает. Кроме того, влагосодержание материала у поверхности уменьшается и приближается к

гигроскопическому значению, при этом концентрация пара у поверхности испарения снижается, приближаясь к концентрации пара в окружающей среде. Вследствие уменьшения разности концентраций скорость внешнего массопереноса (от поверхности тела в окружающую среду) снижается, и скорость сушки убывает. При достижении материалом равновесного влагосодержания W_p процесс сушки прекращается.

Следует отметить, что кривые скорости сушки в период падающей скорости могут быть различной конфигурации, как показано на рисунке 7. По форме кривых во многих случаях можно судить о форме связи влаги с материалом и о влиянии различных факторов на процесс сушки. Простейшая линия сушки является прямой, на рисунке отмечена номером 1. Она характерна для тонких пористых материалов, например, для бумаги, тонкого картона, ткани. Линии типа 2 соответствуют сушке коллоидных тел, а линии типа 3 отвечают сушке капиллярно-пористых материалов.

Для анализа сушки используют также и температурные кривые, под которыми понимается зависимость между средней температурой материала и его средним влагосодержанием $\bar{T} = y(\bar{W})$. Типичная температурная кривая сушки влажных материалов представлена на рисунке 8. Температурные кривые используются при разработке технологий сушки, проектировании и расчете промышленных сушилок, так как сушимые материалы являются термолабильными и их качество сушки зависит от температуры нагрева и длительности ее воздействия. Температурные кривые в ряде случаев также позволяют оценить формы связи влаги с материалом. Как видно из рисунка 8 в начале процесса сушки при уменьшении влагосодержания средняя температура материала быстро повышается от начальной величины T_n и принимает постоянное значение, равное температуре испаряющейся жидкости, т. е. температуре мокрого термометра $T_{м.т.}$. Эта температура остается постоянной до критической точки K_1 , начиная с которой температура материала повышается. Ее рост продолжается до температуры окружающей среды T_c при W_p . Точке K_1

соответствует критическое значение влагосодержания $W_{кр1}$. На температурной кривой в периоде падающей скорости сушки имеется вторая критическая точка K_2 , начиная с которой температура тела становится линейной функцией влагосодержания. Влагосодержание $W_{кр2}$, соответствующее второй критической точке K_2 , называется вторым критическим влагосодержанием.

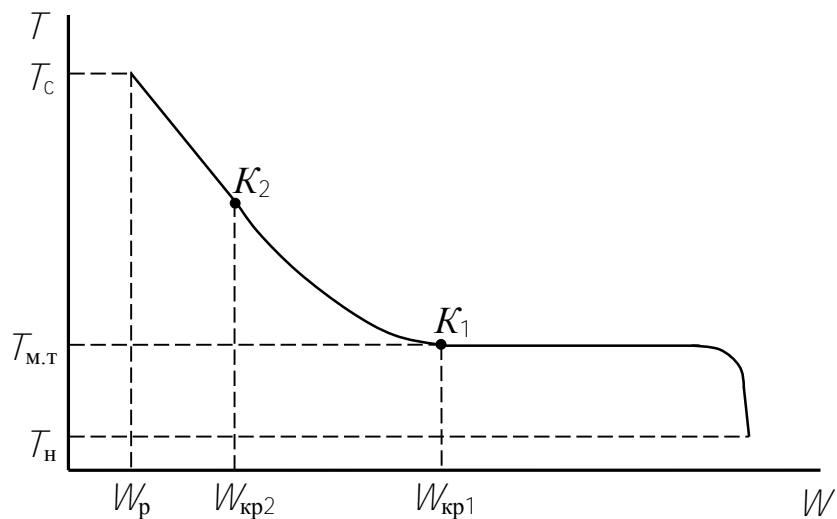


Рисунок 8. Типичная температурная кривая влажных материалов

Уравнение кинетики сушки

В период падающей скорости сушки интенсивность сушки j_n и интенсивность теплообмена q_n непрерывно уменьшаются с течением времени. Изменение интенсивности сушки определяется формой связи влаги с материалом и механизмом перемещения влаги и тепла внутри материала. Пользуясь интегральными законами сохранения энергии и массы вещества, можно установить взаимосвязь средних значений влагосодержания \bar{W} и температуры \bar{T} с интенсивностями тепло- и массообмена j_n и q_n , а следовательно, и скоростью сушки в виде уравнения баланса тепла. При выводе соответствующего уравнения предполагается, что вся теплота, подведенная к телу, равно теплоте, потраченной на испарение влаги, и теплоте, использованной на его нагрев. Опуская несущественные промежуточные выкладки, запишем

основное уравнение кинетики сушки, дающее связь между теплообменом q_n и массообменом $d\bar{W}/dt$ в виде:

$$q_n(t) = \rho_0 R_v r \frac{d\bar{W}}{dt} (1 + Rb). \quad (12)$$

Здесь ρ_0 – плотность сухого тела; R_v – отношение объема сухого материала к поверхности влажного тела; r – удельная теплота испарения влаги. В эту же формулу входит критерий Ребиндера Rb , который определяется формулой:

$$Rb = \frac{c}{r} \frac{d\bar{T}}{d\bar{W}} = \frac{cb}{r},$$

где c – теплоемкость влажного тела; $b = \frac{d\bar{T}}{d\bar{W}}$ – температурный коэффициент сушки. Температурный коэффициент сушки b определяется из температурной кривой материала.

В безразмерном виде уравнение (12) принимает следующий вид:

$$q_n^*(t) = \left(\frac{d\bar{W}}{dt} \right)^* (1 + Rb), \quad (13)$$

где $\left(\frac{d\bar{W}}{dt} \right)^* = \frac{d\bar{W}}{dt} \frac{1}{N}$ – безразмерная скорость в период падающей скорости сушки, $N = \text{const}$ – скорость в период постоянной скорости сушки, имеющая размерность, обратную размерности времени.

Для того чтобы воспользоваться основным уравнением кинетики сушки, согласно уравнению (12), необходимо знать уравнение кривой сушки. К настоящему времени имеются лишь приближенные экспериментальные

зависимости $\bar{W} = f(t)$. Ниже приводится наиболее простое приближенное уравнение кривой сушки с минимальным количеством констант, определяемых опытным путем. Оно получается из упрощенного линейного уравнения кривой скорости сушки во втором периоде, имеющем вид:

$$-\frac{dW}{dt} = K(W - W_p), \quad (14)$$

где

$$K = \frac{N}{W_{к.п} - W_p} = \chi N.$$

Здесь K – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом сушки и имеющий размерность, обратную размерности времени; $W_{к.п.}$ – приведенное критическое влагосодержание; W_p – равновесное влагосодержание; χ – относительный коэффициент сушки.

Интегрируя уравнение (14) получим приближенное уравнение кривой сушки

$$\frac{W - W_p}{W_{к.п} - W_p} = \exp(-Kt) = \exp(\chi Nt). \quad (15)$$

Проводя несложные преобразования, его можно привести к виду:

$$\lg(W - W_p) = \lg(W_{к.п} - W_p) - \frac{1}{2,3} Kt.$$

Тогда, зная экспериментально полученную кривую сушки материала, коэффициент K определится по формуле:

$$K = \frac{2,3 \left[\lg(W_1 - W_p) - \lg(W_2 - W_p) \right]}{t_2 - t_1},$$

где W_1 и W_2 – значения влагосодержания материала соответственно для времени t_1 и t_2 .

Лыковым А.В. было показано, что в широком диапазоне начальных влагосодержаний для различных материалов относительный коэффициент сушки χ обратно пропорционален начальному влагосодержанию W_H материала:

$$\chi = \frac{1,8}{W_H}.$$

В этом случае уравнение кривой скорости сушки имеет вид:

$$-\frac{dW}{d\tau} = 1,8 N \left(\frac{W - W_p}{W_H} \right).$$

Тогда основное уравнение кинетики сушки, выраженное формулой (13), запишем так:

$$q_n^*(\tau) = 1,8 \left(\frac{W - W_p}{W_H} \right) [1 + Rb].$$

Время сушки

Используя приближенное уравнение кривой сушки в период падающей скорости (15) и значение скорости сушки N в первый период, получим формулу для расчета общей продолжительности сушки. Для периода постоянной скорости сушки имеем

$$t_1 = \frac{1}{N} (W_n - W_{кр}). \quad (16)$$

Для периода падающей скорости сушки на основе уравнения (15) получим

$$t_2 = \frac{W_{кр} - W_p}{N} \cdot 2,3 \lg \frac{W_{кр} - W_p}{W_k - W_p} \quad (17)$$

Тогда общую продолжительность сушки рассчитаем по формуле

$$t = t_1 + t_2 = \frac{1}{N} (W_n - W_{кр}) + \frac{W_{кр} - W_p}{N} \cdot 2,3 \lg \frac{W_{кр} - W_p}{W_k - W_p} \quad (18)$$

В формулах (16), (17) и (18) величины W_n , $W_{кр}$, W_k , W_p обозначают соответственно начальное, критическое, конечное и равновесное влагосодержание материала. Если к первому слагаемому в скобках уравнения (18) добавить и отнять W_p , то (18) можно представить в виде:

$$t = \frac{W_n - W_p}{N} - \frac{1 + 2,3 \lg \chi (W_k - W_p)}{\chi N} \quad (19)$$

В уравнении (19) отсутствует величина $W_{кр}$. Для определения общей продолжительности сушки необходимо знать скорость сушки в периоде постоянной скорости сушки N , равновесное W_p и начальное W_n влагосодержания и относительный коэффициент сушки χ , который приближенно равен $1,8/W_n$. Следовательно, необходимо знать три величины (W_n , W_p и N).

Деформирование

Все коллоидные капиллярно-пористые системы в процессе сушки сокращаются. Причем усадка для многих тел может иметь значительную величину. Так большую усадку дают такие материалы как торфа, строительные материалы, пищевые продукты, кожи и т.д. Уменьшение размеров приводит к развитию напряженно-деформированного состояния в материале. Причиной усадки коллоидных капиллярно-пористых систем является сильная связь воды со структурой материала, при которой молекулы воды проникают внутрь скелета, увеличивая расстояние между его частицами. Водяные пленки за счет расклинивающего давления еще больше раздвигают частицы. Свой вклад в набухание вносит и осмотическое давление. Такую связанную воду удаляют путем подвода тепла и испарения жидкости. Очевидно, что размеры материала при этом будут уменьшаться. Поэтому, сушка представляет собой процесс переноса тепла, влаги и развития напряженно-деформированного состояния. Рассмотрение сушки без учета усадки и напряжений является идеализацией. Такую идеализацию возможно использовать, когда усадка и напряжения в материале не имеют значения. Однако, принимая во внимание лишь процессы тепло- и массопереноса, можно получить неверные результаты. Так для материалов с большими коэффициентом усадки и начальным влагосодержанием расчет может привести к неправильному определению кинетики и времени окончания процесса сушки.

Уменьшение размеров тела в процессе сушки называется усадкой. Ряд материалов, например глина, дает усадку не на протяжении всего процесса, а только в период постоянной скорости сушки, причем усадка прекращается примерно при достижении критической влажности. Другие тела сокращаются только в период падающей скорости сушки, т.е. усадка начинается лишь при достижения определенного влагосодержания, тоже приблизительно равного критическому влагосодержанию. К таким материалам относятся древесина, уголь. Многие объекты меняют свои размеры на протяжении всего процесса сушки. К таким телам относятся торф, кожа, зерно, тесто, хлеб. Эксперименты

по сушке различных материалов показывают, что изменение линейных размеров тела с уменьшением его влагосодержания происходит по закону прямой. Принимая l за линейный размер при влагосодержании W запишем

$$l = l_0 (1 + \beta_p (W - W_0))$$

где l_0 – постоянная величина. Для материалов, у которых усадка происходит в период падающей скорости сушки, l_0 есть линейный размер абсолютно сухого материала. Для материалов, которые не имеют усадки в период падающей скорости, l_0 представляет отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат. Величина β_p , определяемая соотношением $\beta_p = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dW}$, называется коэффициентом разбухания.

В материалах, которые дают усадку во время сушки, развиваются напряжения, приводящие к короблению, трещинообразованию либо к полному их разрушению. В свою очередь напряжения в материале возникают при наличии недопустимых усадок, вызванных неравномерностью распределения влаги внутри материала. Растягивающие напряжения на поверхности материала σ в зависимости от перепада влагосодержания между центром $W_{ц}$ и поверхностью $W_{п}$ можно оценить по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{E}{1 - \nu} \left[\left(1 + \frac{2}{3} \frac{\beta_p (W_{ц} - W_{п})}{1 + \beta_p \left[W_{п} + \frac{2}{3} (W_{ц} - W_{п}) \right]} \right)^2 - 1 \right]$$

Для определения полного напряженно-деформированного состояния материала в процессе сушки, вызванного градиентом влагосодержания,

необходимо решать связанную задачу тепломассопереноса и механического движения.

Система дифференциальных уравнений

Согласно ранее сказанному, процесс сушки включает в себя перемещение влаги внутри материала, парообразование и перемещение влаги, с поверхности материала в окружающую среду. Испарение влаги с поверхности материала создает перепад влагосодержания между последующими слоями и поверхностным слоем, что вызывает обусловленное диффузией перемещение влаги из нижележащих слоев к поверхностным. Перемещение влаги внутри материала к поверхности тела происходит как в жидкой, так и паровой фазе, причем доля парового потока с уменьшением влажности материала возрастает. Движение жидкости осуществляется за счет действия расклинивающего давления, капиллярных, осмотических, гравитационных и термокапиллярных сил. Движение пара обусловлено молекулным переносом, взаимной диффузией молекул пара и воздуха, кнудсеновской диффузией в порах, размер которых соизмерим со средней длиной свободного пробега молекул, термодиффузией и бародиффузией пара, стефановским потоком, тепловым скольжением и циркуляцией парогазовой смеси в порах. Доля каждого из этих потоков зависит от размера и конфигурации пор, характера соединений их между собой, состояния поверхности скелета твердого тела (определяющего, в частности, степень смачиваемости стенок пор жидкостью), температуры, давления и физических свойств среды заполняющей поры. В реальных коллоидных капиллярно-пористых телах явления с различными механизмами переплетаются между собой, причем доля каждого из них в общем потоке влаги непрерывно меняется с течением процесса. Это создает сложную картину тепломассопереноса.

Наиболее полное описание процессов сушки формируется на основе знаний о полях влагосодержания и температуры в высушиваемом материале, и о полях массовой доли воды и температуры в сушильном агенте. Их нахождение

основано на решении системы уравнений тепло- и массопереноса при соответствующих граничных условиях, отражающих способ и режим сушки. Эта система является системой нелинейных взаимосвязанных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных. В нее входит внутренняя задача тепло- и массопереноса, описывающая перенос тепла и влаги внутри материала, так и внешняя задача тепло- и массопереноса, связанная с движением паров воды в сушильном агенте и процессами нагревания и охлаждения влажного воздуха в камере. Рассмотрим каждую из них.

Внутреннюю задачу тепло- и массопереноса запишем на основе уравнений Лыкова А.В. Учитывая факт деформирования высушиваемого материала, представим их в криволинейных координатах в тензорном виде. Уравнения теплопереноса есть:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^k} \left(g^{kl} \sqrt{g} \lambda_{kl} \frac{\partial T}{\partial x^l} \right) + \varepsilon Q_\phi \rho_0 \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (20)$$

где c – удельная теплоемкость; ρ_0 – плотность сухого материала; g^{kl} – контравариантные компоненты метрического тензора; g – определитель метрического тензора; λ_{kl} – компоненты коэффициента теплопроводности; ε – критерий фазового перехода; Q_ϕ – удельная теплота парообразования.

Уравнение массопереноса в криволинейных координатах выглядит так:

$$\rho_0 \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^k} \left(g^{kl} \sqrt{g} a_{wkl} \rho_0 \frac{\partial W}{\partial x^l} \right) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^k} \left(g^{kl} \sqrt{g} a_{wkl} \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial x^l} \right), \quad (21)$$

где a_{wkl} – компоненты коэффициента диффузии влаги; δ – термоградиентный коэффициент.

Учитывая, что тело меняет свои размеры и форму, необходимо воспользоваться уравнением механического деформирования. Для этого запишем следующее уравнение равновесия упругого тела в перемещениях:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial \chi^i} (u_{;\alpha}^{\alpha}) + \mu g^{j\beta} (u_{i;\beta})_{;j} + \left(\frac{1}{2} \lambda g_i^j g^{\alpha\beta} + \mu g_i^{\alpha} g^{j\beta} \right) \left\{ (u_{k;\alpha})_{;j} u_{;\beta}^k + u_{k;\alpha} (u_{;\beta}^k)_{;j} \right\} - (22)$$

$$-(3\lambda + 2\mu) \beta \frac{\partial}{\partial \chi^i} W = 0,$$

где точкой с запятой (;) обозначена ковариантная производная; λ , μ – коэффициенты Ламе; β – коэффициент линейной усадки; u^{α} – вектор перемещения.

Ковариантные производные ковариантного и контравариантного векторов соответственно имеют вид:

$$u_{i;j} = \frac{\partial u_i}{\partial \chi^j} - u_m \Gamma_{ij}^m, \quad u^i_{;j} = \frac{\partial u^i}{\partial \chi^j} + u^m \Gamma_{mj}^i. \quad (23)$$

Здесь Γ^i_{ik} – символы Кристоффеля. Вторые производные, используемые в выражении (60), определяются следующим образом:

$$(u_{i;\beta})_{;j} = \frac{\partial^2 u_i}{\partial \chi^j \partial \chi^{\beta}} - \frac{\partial u_m}{\partial \chi^j} \Gamma_{i\beta}^m - u_m \frac{\partial \Gamma_{i\beta}^m}{\partial \chi^j} - \frac{\partial u_m}{\partial \chi^{\beta}} \Gamma_{ij}^m + u_l \Gamma_{m\beta}^l \Gamma_{ij}^m - \frac{\partial u_i}{\partial \chi^m} \Gamma_{\beta j}^m + u_l \Gamma_{im}^l \Gamma_{\beta j}^m, \quad (24)$$

$$(u_{;\beta}^k)_{;j} = \frac{\partial^2 u^k}{\partial \chi^j \partial \chi^{\beta}} + \frac{\partial u^m}{\partial \chi^j} \Gamma_{m\beta}^k + u^m \frac{\partial \Gamma_{m\beta}^k}{\partial \chi^j} + \frac{\partial u^m}{\partial \chi^{\beta}} \Gamma_{mj}^k + u^l \Gamma_{l\beta}^m \Gamma_{mj}^k - \frac{\partial u^k}{\partial \chi^m} \Gamma_{\beta j}^m - u^l \Gamma_{lm}^k \Gamma_{\beta j}^m. \quad (25)$$

Дивергенция вектора перемещений имеет вид

$$u_{;\alpha}^{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^{\alpha}} \left(g^{\alpha m} \sqrt{g} u_m \right). \quad (26)$$

Уравнения (20) – (26) следует дополнить соотношениями

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (u_{\beta;\alpha} + u_{\alpha;\beta} + u_{k;\alpha} u_{;\beta}^k), \quad \varepsilon_{\alpha}^{\alpha} = g^{\alpha\beta} \varepsilon_{\alpha\beta}, \quad \varepsilon^{ij} = g^{i\alpha} g^{j\beta} \varepsilon_{\alpha\beta},$$

$$g_{ij} = 2\varepsilon_{ij} + g_{0ij}, \quad g^{ij} g_{jk} = \delta_k^i, \quad g = \det g_{ik}, \quad \Gamma'_{ik} = \frac{1}{2} g^{ml} \left(\frac{\partial g_{im}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{km}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^m} \right).$$

Теперь рассмотрим внешнюю задачу тепло- и массопереноса. Уравнения аэродинамики и тепло- и массообмена влажного воздуха в сушильной камере хорошо описываются в прямоугольной декартовой системе координат. Уравнение (27) представляет закон сохранения массы сушильного агента:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0. \quad (27)$$

Здесь ρ – плотность сушильного агента, v_x, v_y, v_z – компоненты скорости газа.

Закон сохранения импульса определяется следующими тремя уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} \right).$$

Здесь P – газодинамическое давление, μ_e – эффективная вязкость воздуха.

Для определения эффективного μ_e и турбулентного μ_t коэффициентов вязкости используется стандартная k - ε модель. Уравнение турбулентной кинетической энергии k имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \varepsilon.$$

Здесь σ_k – турбулентное число Прандтля для турбулентной кинетической энергии, μ – молекулярная вязкость. Величина $G_k = -\rho \overline{v_i v_j} \frac{\partial v_j}{\partial x_i}$ есть генерация турбулентной кинетической энергии. В соответствии с гипотезой Буссинеска G_k вычисляется по формуле $G_k = \mu_t S^2$, где S – инвариант тензора скорости деформации, определенный как $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$, где $S = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)$ – тензор скорости деформации. Величина $-\rho \overline{v_i v_j}$ есть напряжение Рейнольдса. Последнее слагаемое ε описывает скорости диссипации турбулентной кинетической энергии, которая определяется из решения уравнения (28).

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии ε в рамках стандартной k - ε модели имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (28)$$

Здесь σ_ε – турбулентное число Прандтля для скорости диссипации турбулентной кинетической энергии, а $C_{1\varepsilon}$ и $C_{2\varepsilon}$ – константы.

Определив турбулентную кинетическую энергию k и скорость диссипации турбулентной кинетической энергии ε , рассчитаем турбулентный μ_t и эффективный μ_e коэффициенты вязкости по формулам:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$\mu_e = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}.$$

Здесь C_μ является константой.

Для расчета температурного поля сушильного агента используем уравнение:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial T}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_V,$$

где Q_V – тепловые источники, c – теплоемкость сушильного агента, λ_e – эффективный коэффициенты теплопроводности. Турбулентный λ_t и эффективный λ_e коэффициенты теплопроводности рассчитываются по формулам:

$$\lambda_t = \frac{\mu_t C}{Pr_t},$$

$$\lambda_e = \lambda + \frac{\mu_t C}{Pr_t},$$

где λ – коэффициент молекулярной теплопроводности, Pr_t – температурное число Прандтля.

Диффузию пара в воздухе определяем из следующего уравнения:

$$\rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial C}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial C}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_e \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_e \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_e \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

где C – массовая доля воды в паровоздушной смеси, D_e – эффективный коэффициент диффузии. Турбулентный D_t и эффективный D_e коэффициенты диффузии рассчитываются по формулам:

$$D_t = \frac{\mu_t}{\rho Sc_t},$$

$$D_e = D + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t}.$$

Здесь Sc_t – турбулентное число Шмидта, D – молекулярный коэффициент диффузии.

Для замыкания данных уравнений используются граничные условия, которые зависят от конкретных решаемых задач. Они будут определяться конструкцией и геометрией сушилки, расположением сушимого материала и

вспомогательного оборудования в ней, сопряжением камеры с внешней средой, способом и режимом сушки и т.д.

Вычислительный эксперимент как база в компьютерных технологиях конструирования сушильных установок

Излагаемая здесь физико-математическая модель позволяет конструировать сушильные установки без создания на первом этапе дорогостоящих опытных образцов и проведения сложных экспериментов. В место этого достаточно на основе приведенной выше физико-математической модели и трехмерной геометрической конструкции сушилки выполнить вычислительный эксперимент, где объектом исследования является сушильная установка в целом.

В связи с этим, представим общую структуру расчета и конструирования сушильных установок:

1. Разработка трехмерной геометрической компьютерной конструкции сушильной установки, которая выполняется на основе современных систем автоматизированного проектирования.

2. Разработка физико-математической модели, включающей тепло- и массообмен, аэродинамику и напряженно-деформированное состояние, с учетом всех рассмотренных в пособии аспектов сушки влажных коллоидных капиллярно-пористых материалов.

3. Проведение вычислительного эксперимента по изучению работы сушильной установки с использованием программного комплекса 3D моделирования процессов аэродинамики, тепло- и массопереноса и механического деформирования твердых тел. Определение искомых параметров сушильной установки и вспомогательного оборудования.

4. При необходимости внесения изменений в конструкцию установки или вспомогательного оборудования проводится разработка новой геометрической конструкции или модернизация существующей. На основе новых данных переходим к реализации пункта 3.

5. Повторяем этапы 3 и 4 до полного решения поставленной задачи конструирования установки.

Одновременно с разработкой сушилки дополнительно получаем детальное описание процессов тепло- и массопереноса в высушиваемом материале и влажном воздухе, газодинамическое поведение сушильного агента и напряженно-деформированное состояние твердого тела. Эти сведения позволяют при необходимости быстро и эффективно вносить изменения в конструкцию установки, добиваясь ее оптимальной работы. При заданной конструкции сушилки численный расчет и вычислительный эксперимент дают возможность разрабатывать режимы сушки и способы удержания процесса сушки в диапазоне допустимых параметров, определенных режимом. Разработка режимов сушки является самостоятельной задачей и может быть не связана с конструированием сушильных установок.

Список использованных источников

1. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярнопористых телах / А.В. Лыков. – М.: Гостехиздат, 1954. – 296 с.
3. Чураев, Н.В. Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н.В. Чураев. – М.: Химия, 1990. – 272 с.
4. Сычевский, В.А. Процессы тепломассопереноса, деформации и подвижные границы в дисперсных системах / В.А.Сычевский. - Минск: Гос. науч. учреждение «Институт тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ», 2009. – 227 с.
5. Сажин, Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 448 с.
6. Гинзбург, А.С. Технология сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 248 с.
7. Муштаев, В.И. Сушка дисперсных материалов /В.И. Муштаев, В.М. Ульянов – М.: Химия, 1988. – 352 с.
8. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
9. Гинзбург, А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А.С. Гинзбург. – М.: Агропромиздат, 1985. – 336 с.
10. Лебедев, П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П.Д. Лебедев. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.
11. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 443 с.
12. Расев, А.И. Сушка древесины / А.И. Расев. – М.: Высшая школа, 1980. – 181 с.