

4.7 Теплоэнергетика

УДК 675.026.267

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дрюков В. В., к.т.н., доц., Котов А. А., асс., Кузьменков С. М., асс.

*Витебский государственный технологический университет,
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. Изложен метод расчета процесса сушки тонких плоских материалов на основе уравнения кинетики сушки, устанавливающий связь между величинами, определяющими теплообмен по коэффициенту теплоотдачи и влагообмен по относительной скорости сушки. На основе уравнения кинетики сушки по данным влагообмена полностью описывается процесс теплообмена. Рассмотрен экспериментальный метод расчета температуры материала в период падающей скорости сушки для сушки пористой керамики, листового асбеста и шерстяного войлока. Дана зависимость относительной скорости сушки от относительного влагосодержания и экспериментальный метод расчета коэффициента теплоотдачи для периода падающей скорости сушки. Предложен способ определения скорости сушки по значениям скорости сушки в период постоянной скорости и относительной скорости сушки. Представлены уравнения для расчета интенсивности сушки и плотности тепловых потоков. Дано сопоставление расчетных значений параметров сушки по полученным формулам с экспериментальными для сушки керамики, асбеста и войлока.

Ключевые слова: кинетика сушки, коэффициент теплоотдачи, относительная скорость сушки, относительное влагосодержание, температура.

Температура материала в процессе сушки является важнейшим параметром, отвечающим за качество готового продукта. Для описания кинетики сушки необходимо знать изменение среднеинтегральных характеристик влажного материала – влагосодержаний $\bar{u}$ и температуры $\bar{t}$ с течением времени τ . Изменения средних влагосодержаний $\bar{u}$ и температуры $\bar{t}$ определяются закономерностями взаимодействия поверхности влажного тела с окружающей средой [1, 2]. Сушка тонких капиллярно-пористых материалов протекает в условиях внешней задачи, когда скорость сушки слабо зависит от внутреннего сопротивления переносу, и определяется только условиями внешнего теплового взаимодействия поверхности испарения материала с окружающей средой.

Для определения температуры в периоде падающей скорости сушки необходимо знать зависимость между влагосодержанием влажного тела $\bar{u}$ и временем сушки τ . [2, 3]. Такую зависимость можно получить решением дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, однако решение такой задачи оказывается очень сложным в аналитическом отношении, поскольку коэффициенты тепловлагопереноса находятся в сложной форме зависимости от влагосодержания и температуры [2]. Поэтому для практики сушки представляют интерес экспериментальные, приближенные, достаточно простые и надежные уравнения, содержащие минимальное число постоянных, определяемых из опыта.

Особенности процесса сушки тонких материалов, имеющих большую удельную поверхность, проявляются по характеру изменения влагосодержания $\bar{u}$ и температуры $\bar{t}$ с течением времени τ .

При «мягких» режимах сушки стадия прогрева материала происходит с малым промежутком времени, а температура материала быстро повышается от начальной t_0 до температуры мокрого термометра t_M , приблизительно равной температуре на поверхности материала t_{Π} . Для тонких материалов стадия прогрева мала и отсчет влагосодержания во времени проводится от начального влагосодержания $\bar{u}_0$. После стадии прогрева влагосодержание $\bar{u}$ уменьшается по линейному закону до гигроскопического $\bar{u}_{кр}$. Скорость сушки в этом периоде $d\bar{u}/d\tau = N$, величина постоянная – период постоянной скорости сушки (первый период сушки). Период постоянной скорости сушки является также и периодом постоянной температуры на уровне t_M . При уменьшении влагосодержания $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$ начинается период падающей скорости сушки (второй период) с непрерывным повышением температуры до температуры среды t_c при времени

сушки $\tau \rightarrow \infty$. Тонкие материалы с большой удельной поверхностью при «мягких» режимах сушки имеют незначительные перепады влагосодержаний и градиентов температуры по сечению влажного тела [1].

Основное уравнение кинетики сушки, устанавливающее взаимосвязь влагообмена с теплообменом, имеет вид

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^*(1 + Rb), \quad (1)$$

где q_I, q_{II} – плотности потока теплоты в первом и втором периодах сушки, Rb – число Ребиндера.

Относительная скорость сушки

$$N^* = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|, \quad (2)$$

где N – скорость сушки в первом периоде, $d\bar{u}/d\tau$ – скорость сушки во втором периоде.

При температуре $t = 100^\circ\text{C}$ теплота парообразования $r \approx 2250$ кДж/кг, а удельные теплоемкости материалов $c_o \approx 0,8 \div 1,3$ кДж/кг·град. Следовательно, расход тепла на нагрев влажного тела в процессе сушки от общего количества тепла составляет 4 %. Практически вся теплота идет на испарение влаги из материала.

Пренебрегая величиной числа Rb , при малых его значениях, запишем

$$\frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} \approx N^* \quad (3)$$

где $\Delta t_I, \Delta t_{II}$ – разности температур в первом и втором периодах сушки.

Экспериментально установлено, что коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ является величиной постоянной только в периоде постоянной скорости сушки [1–3]. В периоде падающей скорости он непрерывно уменьшается, приближаясь к величине $\bar{\alpha}$ для сухого тела. П. Д. Лебедевым было предложено учитывать это уменьшение $\bar{\alpha}$ эмпирической формулой [1–3]:

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n, \quad (4)$$

где показатель степени n не зависит от режима сушки и для каждого материала определяется экспериментально.

Для расчета коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ необходимы экспериментальные кривые сушки $\bar{u} = f(\tau)$, кривые скорости сушки $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ и температурные кривые $\bar{t} = f(\bar{u})$ [4].

В результате обработки экспериментов по сушке различных влажных материалов при разных режимах сушки были получены обобщенные зависимости, общие для всех исследованных материалов [2, 4]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = N^{*0,57}, \quad (5)$$

относительная температура материала

$$T^* = \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_M} \approx N^{*0,43}, \quad (6)$$

Температура на поверхности материала

$$t_{II} \approx t_c - N^{*0,43} (t_c - t_M). \quad (7)$$

Принимая в уравнении (5) среднее значение $n = 0,70$, получаем

$$N^* = \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,28}, \quad (8)$$

Подставляя в формулу (6) уравнение (8), получим уравнение температурной кривой

$$t_{II} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,28} \right)^{0,43} ;$$

$$t_{II} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,55} .$$
(9)

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Белорусская наука, 2010. – 443 с.
3. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
4. Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и экспериментальные методы расчета температуры материала в процессе сушки / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. – 2013 – Т. 86, № 3. – С. 584–594.

УДК: 66.048.5-957

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОСТОГО ВЫПАРИВАНИЯ

**Александрйская М. К., студ., Овчинников В. А., студ.,
Пашаев А. Р., студ., Агафонова И. В., к.т.н., доц.**

Российский институт транспорта (РУТ), г. Москва, Российская Федерация

Реферат. В статье рассмотрен процесс концентрации растворов методом простого выпаривания, широко применяемый в таких отраслях промышленности, как пищевая, химическая, фармацевтическая, а также для опреснения солёной воды для технологических целей и питьевого назначения. Выпаривание – высокоэнергоемкий процесс, требующий большого количества углеводородных ресурсов. Поиск путей энергосбережения в этой области является актуальным.

Ключевые слова: выпаривание, энергосбережение, ресурсосбережение, многокорпусная выпарная установка, выпарной аппарат.

Выпаривание – процесс повышения концентрации растворов, при котором жидкость переходит в газообразное состояние под воздействием тепла, с последующим уменьшением объёма жидкости. Так получают концентрированные продукты многих веществ, например, нитрата аммония, едкого натра, едкого калия и т. д. Этот метод используется также для выделения твёрдых компонентов из жидких смесей. Выпаривание применяется в пищевой, химической, фармацевтической и других отраслях промышленности.

Выпарная установка состоит из выпарного аппарата и вспомогательных устройств: теплообменника, конденсатора и т. п. Основные элементы выпарного аппарата – греющая камера, испарительная камера и сепаратор. В греющей камере растворы разогреваются до нужной температуры, в испарительной камере происходит кипение. Сепаратор обеспечивает отделение капель жидкости от пара. Также составляющими выпарных аппаратов являются устройства для циркуляции и транспортировки раствора.

Выпаривание производится на установках малой производительности, а также в аппаратах периодического действия при высокой депрессии. Вторичный пар в однокорпусных установках не используется, а просто удаляется. Простое выпаривание остаётся одним из самых распространённых методов концентрирования растворов благодаря своей простоте и универсальности.