

РАСЧЕТ ТЕПЛОЕМОСТИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА ПРИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОЙ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ

Рассчитаны средние значения изобарных удельных теплоемкостей сушильного агента в практических диапазонах изменения температуры и влагосодержания паровоздушной смеси при конвективной рециркуляционной сушке. Определенные относительные погрешности замены истинных теплоемкостей средними значениями в соответствующих диапазонах находятся в допустимых пределах. Применение средних теплоемкостей позволяет понизить порядок нелинейных уравнений, описывающих происходящие при сушке теплообменные процессы.

Расчет и анализ значений теплоемкости сушильного агента проводятся с целью определения относительной погрешности применения средних теплоемкостей в интервалах рабочих температур рециркуляционных конвективных сушильных установок. Ввиду того, что сушильные процессы происходят при атмосферном давлении, которое можно считать постоянным, рассчитываются изобарные теплоемкости сушильного агента. Теплоемкость газов и паров зависит от температуры, однако при учете этой зависимости порядок нелинейных уравнений математических моделей процессов конвективной сушки повышается, что усложняет дальнейшие расчеты. Поэтому при составлении математических моделей возникает вопрос оправданности применения средних или истинных значений теплоемкости.

При рециркуляционной конвективной сушке теплоносителем (сушильным агентом) является смесь атмосферного воздуха из цеха и рециркулята, составляемая в смесительной камере. Смесь далее подогревается до необходимой входной температуры сушильного агента $t_{вх}$, °С, как правило, в калорифере. Добавление рециркулята позволяет смягчить режим сушки за счет увеличения входного влагосодержания агента $d_{вх}$, кг/кг (при этом уменьшается градиент влагосодержания внутри высушиваемого материала – основная причина деструктивных процессов [1]), а также экономить тепловую энергию, поскольку удельная энтальпия рециркулята выше, чем атмосферного воздуха.

Состав смеси атмосферного воздуха и рециркулята характеризуется кратностью смешения (рисунок 1):

$$n = \frac{d_N - d_a}{d_{от} - d_N},$$

где $d_N, d_a, d_{от}$ – соответственно влагосодержание смеси, атмосферного воздуха и отработанного сушильного агента, кг/кг.

Из рисунка 1, на котором изображена область id-диаграммы влажного воздуха и нанесены линии смешения AC, подогрева NB и теоретического процесса сушки BC, видно, что влагосодержание сушильного агента при подогреве в калорифере не изменяется: $d_N = d_{вх}$, поэтому кратность смешения выражается:

$$n = \frac{d_{вх} - d_a}{d_{от} - d_{вх}}. \quad (1)$$

Для составления смеси необходимо знать массовые расходы атмосферного воздуха M_a , кг/с, и рециркулята M_p , кг/с. Причем из технологических соображений для подачи атмосферного воздуха удобнее взять нерегулируемый вентилятор, т. е. можно считать $M_a = \text{const}$. Производительность вентилятора рассчитывается исходя из производительности установки по удалению влаги из высушиваемого материала. Изменение массового расхода рециркулята M_p может являться одним из управляющих параметров сушильного процесса [1], изменяющим как входное влагосодержание агента, так и его массовый расход.

Параметры атмосферного воздуха в цехе (точка A на рисунке 1) могут изменяться в реальных условиях в следующих диапазонах:

а) температура t_a атмосферного воздуха, °С:

$$15 \leq t_a \leq 30;$$

б) влагосодержание d_a , кг/кг:

$$0,006 \leq d_a \leq 0,014.$$

Определим удельную изобарную теплоемкость атмосферного воздуха c_a , Дж/кг°С:

$$c_a = g_{сва} \cdot c_{св} + g_{па} \cdot c_{п}, \quad (2)$$

где $g_{сва}$ и $g_{па}$ – массовые доли сухого воздуха и водяного пара в атмосферном воздухе; $c_{св}$ и $c_{п}$ – изобарные удельные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара.

Массовые доли сухого воздуха и водяного пара выразим через влагосодержание атмосферного воздуха:

Сухой воздух в установку поступает в составе атмосферного воздуха и рециркулята:

$$M_{св} = M_{сва} + M_{свр} = \frac{M_a}{1 + d_a} + \frac{M_p}{1 + d_{от}}, \quad (8)$$

где $M_{сва}$ и $M_{свр}$ – массовые расходы сухого воздуха в составе атмосферного воздуха и рециркулята, кг/с.

Массовые расходы рециркулята и атмосферного воздуха связаны через кратность смешения (1):

$$M_p = M_a \frac{d_{вх} - d_a}{d_{от} - d_{вх}}. \quad (9)$$

Масса испаряющейся влаги в единицу времени составляет:

$$M_n = M_{св}(d_{от} - d_{вх}). \quad (10)$$

Из уравнений (7) – (10), учитывая, что $g_{св} + g_{п} = 1$, получаем выражения для расчета массовых долей сухого воздуха и водяного пара в отработанном сушильном агенте:

$$g_{св} = \frac{(d_{от} - d_{вх})(1 + d_{от}) + (d_{вх} - d_a)(1 + d_a)}{(d_{от} - d_{вх})(1 + d_{от})(1 + d_a + d_{от} - d_{вх}) + (d_{вх} - d_a)(1 + d_a)(1 + 2d_{от} - d_{вх})}, \quad (11)$$

$$g_{п} = 1 - g_{св}.$$

Учитывая уравнения (11) и применяя уравнения (4) для $t_{от}$, из уравнения (6) получаем выражение для расчета теплоемкости отработанного сушильного агента:

$$c_{от} = 1833 + 0,3111t_{от} - \frac{\left[(d_{от} - d_{вх})(1 + d_{от}) + (d_{вх} - d_a)(1 + d_a) \right] (837,4 + 0,2181t_{от})}{(d_{от} - d_{вх})(1 + d_{от})(1 + d_a + d_{от} - d_{вх}) + (d_{вх} - d_a)(1 + d_a)(1 + 2d_{от} - d_{вх})}. \quad (12)$$

Установим практические диапазоны [1] изменения параметров при сушке с рециркуляцией агента (рисунок 1):

а) температура отработанного сушильного агента $t_{от}$, °С:

$$25 \leq t_{от} \leq 50;$$

б) влагосодержание отработанного сушильного агента $d_{от}$, кг/кг:

$$0,018 \leq d_{от} \leq 0,055;$$

в) влагосодержание сушильного агента на входе в установку $d_{вх}$, кг/кг:

$$0,012 \leq d_{вх} \leq 0,030.$$

Максимальная и минимальная теплоемкости отработанного сушильного агента, рассчитанные по уравнению (12) для принятых диапазонов изменения параметров, составляют 1057 и 1008 Дж/кг°С, отличаются менее чем на 4,9%, что является допустимым для применения в расчетах среднего значения теплоемкости отработанного агента. При наиболее вероятных практических значениях $t_{от} = 40^\circ\text{С}$ и $d_{от} = 0,044$ кг/кг (точка С на рисунке 1), $d_{вх} = 0,021$ кг/кг (точка В), $d_a = 0,009$ кг/кг (точка А) теплоемкость составит $c_{от} = 1051$ Дж/кг°С с предельной погрешностью 4,1%.

Определим теплоемкость смеси атмосферного воздуха и рециркулята в смесительной камере, калорифере и на входе в установку при постоянном влагосодержании $d_N = d_{вх}$ (точки N и В на рисунке 1), учитывая, что теплоемкость рециркулята c_p равна теплоемкости $c_{от}$:

$$c_{вх} = g_a c_a + g_p c_{от}, \quad (13)$$

где g_a и g_p – массовые доли атмосферного воздуха и рециркулята, определяемые через массовые расходы:

$$g_a = \frac{M_a}{M_a + M_p}; \quad g_p = \frac{M_p}{M_a + M_p}. \quad (14)$$

Учитывая соотношения (9) и $g_a + g_p = 1$, находим массовые доли:

$$g_a = \frac{d_{от} - d_{вх}}{d_{от} - d_a}; \quad g_p = \frac{d_{вх} - d_a}{d_{от} - d_a}. \quad (15)$$

Тогда из выражения (13) с учетом (5) и (12) определяем теплоемкость сушильного агента при температуре t_i , °С, где $t_N \leq t_i \leq t_{вх}$:

$$c_{вх} = \frac{(d_{от} - d_{вх}) \left[995,6 + 0,093t_i + d_a (1833 + 0,3111t_i) \right]}{(d_{от} - d_a)(d_a + 1)} + \frac{d_{вх} - d_a}{d_{от} - d_a} \cdot \left[1833 + 0,3111t_i - \frac{\left[(d_{от} - d_{вх})(1 + d_{от}) + (d_{вх} - d_a)(1 + d_a) \right] \cdot (837,4 + 0,2181t_i)}{(d_{от} - d_{вх})(1 + d_{от}) \cdot (1 + d_a + d_{от} - d_{вх}) + (d_{вх} - d_a)(1 + d_a) \cdot (1 + 2d_{от} - d_{вх})} \right]. \quad (16)$$

Рассчитанные по этой формуле значения теплоемкости будут наиболее точными в окрестностях точки N, т. е. когда $t_i \rightarrow t_N$, т. к. в этой области температуры атмосферного воздуха t_a

и отработанного сушильного агента $t_{от}$ находятся в пределах применимости формул (5) и (12) с рассчитанной выше погрешностью.

Теплоемкости сушильного агента в смеси-тельной камере и на входе в установку по формуле (16) составляют соответственно:

а) для точки N (рисунок 1)

при $d_{вх} = 0,021$ кг/кг, $t_i = t_N = 27^\circ \text{C}$;

$d_{от} = 0,044$ кг/кг

и $d_a = 0,009$ кг/кг: $c_{вх} = 1024$ Дж/кг $^\circ \text{C}$;

б) для точки В

при $d_{вх} = 0,021$ кг/кг, $t_i = t_B = 96^\circ \text{C}$;

$d_{от} = 0,044$ кг/кг

и $d_a = 0,009$ кг/кг: $c_{вх} = 1031$ Дж/кг $^\circ \text{C}$.

Как видно, теплоемкость сушильного агента при подогреве в калорифере меняется незначительно – менее чем на 0,7%, что объясняется постоянством влагосодержания смеси атмосферного воздуха и рециркулята в процессе подогрева (линия NB на рисунке 1). Поэтому для расчетов тепловой энергии, затрачиваемой в калорифере, рекомендуется брать значения теплоемкости подогреваемой смеси при температуре $t_i = 60^\circ \text{C}$ и влагосодержании $d_{вх} = 0,021$ кг/кг, которая по формуле (16) составляет $c_{вх} = 1028$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ с предельной погрешностью 0,4% в заданных выше диапазонах изменения параметров процесса.

Кроме того, рассчитанные по формуле (16) значения теплоемкости агента на входе при $t_i = t_B = 96^\circ \text{C}$, $d_{от} = 0,044$ кг/кг и $d_a = 0,009$ кг/кг составляют:

а) при $d_{вх} = 0,012$ кг/кг: $c_{вх} = 1022$ Дж/кг $^\circ \text{C}$;

б) при $d_{вх} = 0,030$ кг/кг: $c_{вх} = 1025$ Дж/кг $^\circ \text{C}$.

Т. е. в принятом диапазоне изменения входного влагосодержания агента теплоемкость в точке В, равная $c_{вх} = 1031$ Дж/кг $^\circ \text{C}$, отличается

не более чем на 0,9% от минимального значения.

Теплоемкость агента в процессе сушки (линия ВС на рисунке 1) изменяется от $c_{вх} = 1031$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ в точке В до $c_{от} = 1051$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ в точке С, т. е. менее чем на 2%. В качестве среднего значения теплоемкости агента $c_{ар}$ в зоне сушки рекомендуется среднее арифметическое от $c_{вх}$ и $c_{от}$, т. е. $c_{ар} = 1041$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ с предельной погрешностью 1,0%.

Таким образом, замена истинных значений изобарных теплоемкостей атмосферного воздуха и сушильного агента их средними значениями при расчетах реальных конвективных рециркуляционных сушильных процессов приводит к незначительным ошибкам, которыми можно пренебречь с целью снижения порядка нелинейных уравнений, описывающих данные процессы. Рекомендуемые для расчетов значения средних теплоемкостей составляют (в скобках даются предельные погрешности в принятых практических диапазонах изменения параметров):

а) для атмосферного воздуха –

$c_a = 1005$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ (0,5%);

б) для отработанного сушильного агента –

$c_{от} = 1051$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ (4,1%);

в) для процесса подогрева –

$c_{вх} = 1028$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ (0,4%);

г) для сушильного агента на входе –

$c_{вх} = 1031$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ (0,9%);

д) для зоны сушки –

$c_{ар} = 1041$ Дж/кг $^\circ \text{C}$ (1,0%).

Наибольшая относительная погрешность средней теплоемкости отработанного сушильного агента объясняется очень широким диапазоном изменения его влагосодержания.

Список использованной литературы:

1. Закируллин Р.С. Оптимизация и автоматизация тепломассообменных технологических процессов конвективной сушки промышленных изделий: Дисс... канд. техн. наук: Защищена 22.04.00. Утверждена 14.07.00; 04200007002, 2000. – 158 с.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1980. – 469 с.