

Секція: Розвиток продуктивних сил і регіональна економіка

Сажин Виктор Борисович

доктор технических наук, профессор, академик, директор

Российский инвестиционно-инновационный

Фонд «Научная Перспектива»

г. Москва, Россия

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МЕТОДЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАМКАХ СТРАТЕГИИ СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ СУШИЛОК

Процессы сушки дисперсных материалов (составляют до 80% от общего числа высушиваемых материалов) входят в число самых энергоёмких, проводятся при высоких относительных скоростях фаз и сопровождаются интенсивным пылением. Нами с сотрудниками разработана стратегия создания оптимальных промышленных сушильных установок для любых дисперсных материалов на основании двух характеристик материала, определяемых экспериментально, - радиуса наиболее тонких пор, из которых по технологической задаче требуется удалять влагу, и коэффициента адгезионно-аутогезионного взаимодействия. Технические решения основаны на традиционных сушилках (и вспомогательном оборудовании), выпускаемых прежде серийно, и сохранившихся в значительном количестве до настоящего времени. Разрушение системы ЦЗЛ (центральных заводских лабораторий) и отраслевых НИИ позволяет организовать стартап регионального значения, который имеет все признаки стать успешным и создать сеть конструкторских бюро с мобильными лабораторными комплексами. В результате без дополнительных вложений войдут в строй промышленные сушильные установки, которые будут заведомо ресурсо-энергосберегающие в рамках технологической задачи для конкретного высушиваемого материала.

Свойства материала, как объекта сушки, зависят от его теплофизических характеристик, определяемых экспериментально. Нестационарные методы находят широкое применение благодаря простоте и кратковременности процесса, в результате чего теплофизические характеристики в процессе их определения мало зависят от возмущающих воздействий. Все нужные для расчёта процесса сушки теплофизические характеристики (теплоёмкость, теплопроводность и температуропроводность), как правило, определяются за один опыт. Можно выделить 5 групп нестационарных методов определения теплофизических характеристик материалов: 1. Методы, предполагающие постоянную температуру на поверхности образца или теплообмен образца со средой постоянной температуры; 2. Методы, предполагающие периодический ход температуры на поверхности образца; 3. Методы нагревания образца в среде, изменяющей свою температуру с постоянной скоростью; 4. Методы монотонного нагрева позволяют в течение одного опыта подучить характеристики при различных температурах; 5. Методы создания теплового импульса на поверхности образца. Практический интерес представляют методы 4 и 5 групп. Методы 4 группы предполагают плавный разогрев или охлаждение тела в широком диапазоне температур с квази-постоянным полем градиентов температур в образце. По характеру основных закономерностей такой режим является обобщением квазистационарного режима или же регулярного режима второго рода. Применяемый в методе лямбдакалориметр, работающий по методу монотонного разогрева, выполнен в виде массивного разъёмного блока с теплозащитной оболочкой. Основание с нагревателем служит для плавного монотонного разогрева калориметра с заданной скоростью. Теплозащитная оболочка с нагревателем создаёт вокруг измерительного устройства зону с изотермическим температурным полем. Сверху изотермической защитной оболочки находится вторая защитная оболочка, имеющая хороший тепловой контакт с

основанием.

Коэффициент теплопроводности рассчитывается по уравнению (1):

$$R = \frac{h}{\lambda} = B \frac{S}{k_T} \cdot \frac{\Delta t_{ob}}{\Delta t_T} - 2R_K \quad (1)$$

где $2R_K$ - тепловое сопротивление на границе контакта образца с плоскостями основания блока и пластины тепломера ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$); R - общее тепловое сопротивление, ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$); h , S - высота и площадь сечения образца; Δt_T - показатель тепломера, град; k_T - коэффициент теплопроводности рабочего слоя тепломера; B - безразмерный коэффициент; Δt_{ob} - перепад температур между образцом и тепловыми контактами.

Зависимости $k_T = f(t)$ и $2R_K = f(t)$ определяются экспериментально из градуировочных опытов по уравнениям (2) – (3):

$$k_T = \frac{C_C \Delta E_C}{k n_T \Delta \tau_C} \quad (2)$$

$$2R_K = B \frac{S}{k_T} \cdot \frac{n_{ob}}{n_T} \quad (3)$$

где k - коэффициент, переводящий показания гальванометра в э.д.с. термостолбика, мВ/дел.; $\Delta \tau_C$ - отрезок времени, за который э.д.с. термопары возрастает на ΔE , мВ/с; n_{ob} - перепад температур по толщине образца; n_T - показания тепломера.

В методах 5 группы реализуется начальная стадия разогрева (при Фурье $F_0 < 0,5$) с неустановившимся температурным полем в материале. Измерения проводятся быстро, есть возможность одновременного определения всех трёх теплофизических характеристик. Существенным ограничением методов является необходимость точного согласования измеренных временных промежутков и соответствующих им температур, а также требование определить точные координаты установки датчика. Кроме того, в период разогрева очень большую роль играет начальное распределение температур и собственные характеристики источников тепла. В результате несложная по конструкции собственно измерительная ячейка

обвязывается сложным комплексом измерительной и регулирующей аппаратуры. Импульсные методы до недавнего времени применялись преимущественно в научных лабораториях. Расширение элементной базы за счёт создания специализированных микросхем повышенной степени интеграции и на их основе программируемых измерительных систем способствует распространению методов теплофизических измерений, основанных на начальной стадии теплообмена. Рассмотрим метод создания теплового импульса на поверхности образца путёмстыка с эталоном. Если два тела с различной температурой привести в соприкосновение, то изменение температуры во времени для каждого из них описывается уравнениями (4) – (5):

$$t = A + Bx + C \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{4a\tau}}} e^{-\frac{u^2}{4a\tau}} du \quad (4)$$

$$t = A + Bx + C \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4a\tau}} \right) \quad (5)$$

Тогда для граничных координат (расстояния $+X$ и $-X$ от плоскости соприкосновения $X=0$) изменение температуры во времени описывается уравнениями (6) – (7):

$$t_1 = t_{x=0} = (t_{H1} + t_{x=0}) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4a_1\tau}} \right) \quad (6)$$

$$t_2 = t_{x=0} = (t_{H2} + t_{x=0}) \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4a_1\tau}} \right) \quad (7)$$

Температура в плоскости контакта определяется из условия непрерывности теплового потока:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=+0} = \lambda_2 \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=-0} \quad (8)$$

После преобразования получим для температуры поверхности соприкосновения:

$$\frac{t_{H2} - t_{x=0}}{t_{x=0} - t_{H1}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = b \quad (9)$$

Тогда температура плоскости соприкосновения:

$$t_{x=0} = \frac{t_{H1}b + t_{H2}}{1+b} \quad (10)$$

Из уравнения (6) находим α_1 по измеренным температурам стержня в точке x для любого τ и по температуре стержня t_{H1} перед стыком. Аналогично из уравнения (7) определяется α_2 . Затем по измеренным температурам из уравнения (9) находится b , после чего при заданной теплоёмкости $c\rho_1$ вычисляется $\lambda = \alpha_1 c_1 \rho_1$, затем из уравнения (9) находим λ_2 и определяем $c\rho_2$.

Импульсные методы удобны с точки зрения сравнительно простого аппаратурного оформления и относительно несложной процедуры обработки результатов измерения. Вместе с тем методы имеют существенное ограничение – необходимость идеального контакта между состыкованными образцами влажного дисперсного материала, что применительно к зернистым средам обеспечить весьма трудно. Возможные пути «обхода» существенно увеличивают погрешности, ухудшают воспроизводимость и снижают корректность теплофизических исследований.

На основе анализа существующих методов нами рекомендуется метод двух температурно-временных точек и импульсный метод плоского источника тепла [1, с. 506; 2, с. 776].

Литература

1. Sazhin B. and Sazhin V. Scientific Principles of Drying Technology. New York: Connecticut - Wallingford (U.K.): Begell House Inc., 2007. 506 p.
2. Сажин Б.С. Научные основы термовлажностной обработки дисперсных и рулонных материалов / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. М.: Химия, 2012. 776 с., ил.