

Список использованных источников

1. Парманчук, В. В. Теплофизические свойства многослойных теплоизоляционных материалов / В. В. Парманчук, В. И. Ольшанский // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2014. – № 27. – С. 87.
2. Лукьянова, Е. Л. Композиционные нетканые материалы из вторичных текстильных отходов : монография / Е. Л. Лукьянова ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2023. – 187 с.
3. ГОСТ 17177–94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний / Изд. стандартов. – 1994.
4. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Осипов, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипов. – Москва : Энергия, 1969. – 391 с.
6. Гусаров, А. М. Оценка и прогнозирование теплозащитных свойств пакетов материалов для специальной защитной одежды пожарных : монография / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – 173 с.
7. Ольшанский, В. И. Метод определения теплофизических свойств нетканых материалов / В. И. Ольшанский, В. Г. Мульц, Е. Л. Зимина // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2021. – № 2 (41). – С. 43–50.

УДК 66.047.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ И СУШКЕ 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. Изложены результаты обработки экспериментальных данных по термической обработке в процессах сушки тонких теплоизоляционных материалов. В результате обработки опытных данных обобщенными комплексными переменными получены формулы для определения плотности тепловых потоков, среднеинтегральных температур, интенсивности испарения влаги, продолжительности процесса термической обработки материалов.

Ключевые слова: влагосодержание, температура, коэффициент сушки, время сушки, теплопроводность, коэффициент теплоотдачи, число Био.

Невозможность точного аналитического решения дифференциального уравнения массопереноса с переменными коэффициентами переноса, зависящими от влагосодержания и температуры материала в очень сложной форме, вызывает необходимость в разработке простых приближенных опытных уравнений для расчета длительности сушки.

Наиболее эффективными являются методы обработки опытных данных, основанные на устойчивых комплексных переменных, характеризующих наиболее общие закономерности протекания процесса и устанавливающие связь между различными параметрами при тепловой обработке материалов.

К обобщенным переменным следует отнести следующие: обобщенное время тепловой обработки $N\tau$, относительная скорость сушки N^* , относительное влагосодержание материала $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$, отношение времени тепловой обработки в первом и втором периодах процесса сушки τ_{II} / τ_I .

Относительная скорость сушки N^* в периоде падающей скорости (второй период) не зависит от режимных параметров процесса и является лишь функцией влагосодержания материала. Анализ опытных данных по тепловой обработке различных влажных материалов показал, что комплексы $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ и τ_{II} / τ_I также являются обобщенными переменными и связаны с величиной скорости сушки в первом периоде N , которая в этом случае также является обобщенной переменной.

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова

$$q^* \approx q_{II} / q_I \approx N^* (1 + Rb), \quad (1)$$

где q^* – безразмерный тепловой поток; q_I, q_{II} – плотности потока тепла соответственно в первом и втором периодах сушки, Вт/м²; число Ребиндера Rb устанавливает связь между теплообменом q^* и влагообменом N^* .

При термообработке тонких плоских влажных материалов расход тепла на нагрев влажного тела много меньше расхода на испарение из него влаги и числа $Rb \ll 1$.

Пренебрегая числом Rb при малых его значениях, приближенно можно записать

$$q^* \approx N^*. \quad (2)$$

Из метода обобщения кривых сушки и скорости сушки вытекает, что обобщенное время $N\tau_{II}$ и относительная скорость сушки N^* являются лишь функцией влагосодержания и можно записать $N^* = f(\bar{u})$, $N\tau_{II} = f(\bar{u})$. Следовательно, для безразмерного потока тепла

$$q^* \approx N^* \approx \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \exp(-a \cdot N \cdot \tau_{II}), \quad (3)$$

$$q^* \approx N^* \approx \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \exp\left(-m \cdot N \cdot \frac{\tau_{II}}{\tau_I}\right), \quad (4)$$

где N – скорость сушки в первом периоде.

Обработкой опытных данных для целого ряда влажных материалов были установлены приближенные выражения для постоянных a и m в уравнениях (3), (4).

Интегрируя уравнения (3) и (4) для второго периода сушки от $\tau = 0$ до текущего τ (мин) и влагосодержания от \bar{u}_{sp} до текущего \bar{u} , где \bar{u}_{sp} – влагосодержание перехода первого периода сушки во второй, получим:

$$\tau_{II} = -\frac{1}{a \cdot N} \ln \left(1 - c \left(\bar{u}_{sp} - \bar{u}_p \right) \right), \quad (5)$$

$$\tau_{II} = -\frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{sp}}{m \cdot N} \ln \left(1 - m \cdot \left(\frac{\bar{u}_{sp} - \bar{u}}{\bar{u}_0 - \bar{u}_{sp}} \right) \right). \quad (6)$$

Обработка кривых проведена в виде степенной и экспоненциальной зависимости. В результате такой обработки данных методом наименьших квадратов получены приближенные формулы:

$$\tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{sp}}{N} A_0 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{sp}} \right)^{-1.25}, \quad (7)$$

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{sp}}{N} M_0 \cdot \exp\left(-2,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{sp}}\right). \quad (8)$$

Из решения дифференциального уравнения тепло- и массопереноса для неограниченной пластины при краевых условиях третьего рода (сушка), при равномерном начальном распределении температуры в пластине, нагреваемой в среде $t_c = const$ при значениях числа Био $Bi < 1$, когда критерий Пოსнова $Pr = 0$ А. В. Лыковым для безразмерных температур ($\bar{\theta}$) и влагосодержаний (\bar{U}) получены уравнения:

$$\bar{\theta} = \frac{t_c - t}{t_c - t_u} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_u} = \exp(-Bi \cdot Fo) = \exp(-m_1 \cdot \tau_{II}), \quad (9)$$

$$\bar{U} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \exp(-Bi_m \cdot Fo_m) = \exp(-m_n \cdot \tau_{II}), \quad (10)$$

где Bi, Bi_m, Fo, Fo_m – тепло- и массообменные критерии Био и Фурье для второго периода. Начальная температура $t_n = t_m$. Из теории регулярного теплового режима для твердых тел заданной формы следует для комплексов $Bi \cdot Fo = m_t \cdot \tau_H$; $Bi_m \cdot Fo_m = m_u \cdot \tau$. Темп нагрева влажного тела m_t и темп убыли влагосодержания m_u находятся экспериментально путем построения графических зависимостей $\ln(t - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(\bar{u}_0 - \bar{u}) = f(\tau)$ для двух произвольных моментов времени регулярного режима.

Из уравнений (9) и (10) определяются среднеинтегральные температуры материала во втором периоде и длительность тепловой обработки и сушки:

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_m) \exp(-m_t \cdot \tau_H), \quad (11)$$

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \cdot \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p}. \quad (12)$$

Интенсивность испарения влаги в периоде падающей скорости сушки рассчитывается следующим образом:

$$j_H = \rho_0 \cdot R_V \cdot \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \rho_0 \cdot R_V \cdot N \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{sp}} = j_I \cdot \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{sp}}, \quad (13)$$

где ρ_0 – плотность сухого материала; R_V – отношение объема тела к поверхности; j_I – интенсивность испарения влаги в первом периоде сушки.

Обработкой опытных данных, основанных на обобщенных комплексных переменных, получены приближенные экспериментальные уравнения для расчета кинетики сушки теплоизоляционных материалов. Инвариантность группы обобщенных переменных позволяет переходить от одного вида переменных к другому, от одной системы координат к другой независимо от режима термической обработки, без проведения дополнительных трудоемких экспериментов. Инвариантность величин обобщенных переменных позволяет сократить число экспериментов, избежать ошибок, уменьшить погрешность обработки опытных данных и разработать более точные приближенные уравнения для расчета основных параметров кинетики сушки.

Список использованных источников

1. Акулич, П. В. (2010), Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск, 2010, 444 с.
2. Левина, Н. С. Исследование кинетики нагрева и сушки пористых материалов / Н. С. Левина // Ползуновский вестник – 2008. – № 1–2. – С. 49–53.
3. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва, 1968. – 472 с.
4. Натареев, О. С. Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала / О. С. Натареев, Н. Р. Кокина, С. В. Натареев // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 67–72.
5. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена с использованным обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 887–897.
6. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованным обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал – 2017. – Т. 90, № 3. – С. 700–713.