

ОПИСАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА СУШКИ ПРИ ЛИМИТИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕЙ ЗАДАЧИ ПО МИНИМУМУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В.А. Батов, О.Е. Харичев, Г.И. Ефремов

Московский государственный открытый университет, г. Москва, Россия

В работе рассматривается описание кинетики процесса сушки при лимитировании внутренней задачи модифицированным квазистационарным методом (МКМ) с использованием минимума экспериментальных данных. Рассмотрено применение МКМ для описания кинетики сушки зерен пшеницы.

Впервые модифицированный квазистационарный метод был приведен О. Левеншпилем в монографии [1] для описания гетерогенных химических реакций. Дальнейшее развитие метода (другое название - метод равнодоступной поверхности) было выполнено Д.А. Франком-Каменецким [2]. Для описания влияния гидродинамики на тепломассообмен в гетерогенных процессах была предложена модификация квазистационарного метода (МКМ) проф. Г.И. Ефремовым [3]. В отличие от квазистационарного метода описанного Левеншпилем и Франком-Каменецким в МКМ были введены характеристическое время процесса σ и фактор гидродинамической активности m , позволяющие учесть влияние температуры, свойств системы и конвективных токов на тепломассообмен, и в частности на процесс сушки. Детальное применение МКМ для процессов сушки рассмотрено в монографии [4]. Преимущества применения МКМ состоит в его простоте, метод упрощает кинетические расчеты и, что очень важно, позволяет выявить предельные случаи кинетики сушки.

Необходимо отметить, что МКМ применяется при лимитировании внутренней задачи сушки и определенных допущениях. Согласно квазистационарного метода принимается, что вся поверхность обрабатываемого материала является равнодоступной в диффузионном отношении. Это, в частности, реализуется при диффузии в изотропной среде для материалов с изотропными свойствами. МКМ объединяет результаты интегрирования уравнения диффузии с простым граничным условием (постоянная концентрация на поверхности материала) с кинетикой десорбции, аналогичной химической реакции первого порядка. Эти два процесса рассматриваются как две последующие стадии общего процесса кинетики [1-4].

Математическая модель МКМ, определяется следующим уравнением [3, 4]

$$w = \frac{w_0 - w^*}{1 + \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m} + w^*, \quad (1)$$

где w – текущее, w_0 – начальное, а w^* – равновесное влагосодержание материала.

Для нахождения кинетических параметров σ и m этого уравнения при обработке экспериментальных данных удобно использовать его линеаризацию, выполненную путем логарифмирования зависимости (1) в форме безразмерного комплекса концентраций

$$\frac{w_0 - w^*}{w - w^*} - 1 = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m = \frac{1}{MR} - 1 = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m. \quad (2)$$

Здесь безразмерный комплекс концентраций обозначен MR (moisture reduced), как это принято в зарубежной литературе [5]. Линеаризация этой кинетической зависимости

позволяет методом линейной регрессии найти искомые два параметра модели сушки σ и m . Уравнение (2) является безразмерным и может быть использовано также для обобщения опытных данных по сушке различных материалов в самых различных режимах при лимитировании внутренней задачи сушки.

Скорость сушки по МКМ рассчитывается путем дифференцирования (1), в виде

$$N = \frac{m(w_0 - w^*) \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^{m-1}}{\sigma \left[1 + \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m\right]^2}. \quad (3)$$

В данной работе МКМ использован для описания кинетики сушки зерна пшеницы при различных температурах. Для анализа влияния температуры на кинетику были взяты классические опытные данные сушки зерна пшеницы, полученные в ВТИ и приведенные в работе [6]. Кривые сушки представлены на Рис. 1 и являют типичную кинетику конвективной сушки влажных материалов при лимитировании процесса внутренней диффузии. Толщина слоя пшеницы составляла 36 мм. Температура воздуха изменялась от 60 до 120 °С. Начальное влагосодержание w_0 во всех опытах было постоянным и составляло 26 %. Равновесное влагосодержание зерна w^* также было принято постоянным, равным 0,05 %. Расчетные параметры сушки и обозначение опытных точек, приведенные на Рис. 1, 3 и 4 даны в Таблице 1.

При обработке опытных данных было принято во внимание, что гидродинамический режим сушки оставался постоянным во всем диапазоне температур. Поэтому значение безразмерного параметра m (индекса гидродинамической активности) на основании обработки опытных данных принято постоянным и равным 1,2.

Следует отметить, что если индекс гидродинамической активности сушки остается постоянным во всем диапазоне температур, для построения любой линии кинетики сушки (сушка при постоянной температуре) достаточно знать только одну экспериментальную точку этой линии кинетики. Для этой n -точки согласно (2) имеем

$$\frac{1}{MR_n} - 1 = \left(\frac{\tau_n}{\sigma}\right)^m. \quad (4)$$

Обозначив A левую часть уравнения (4), поделив уравнение (2) на (4) имеем

$$\left(\frac{1}{MR} - 1\right) \cdot A^{-1} = \left(\frac{\tau}{\tau_n}\right)^m. \quad (5)$$

Таким образом, зная параметры только одной точки линии кинетики MR_n и соответствующее ей время τ_n , можно записать уравнение кинетики (5) для этой линии

$$MR = \frac{1}{1 + A \left(\frac{\tau}{\tau_n}\right)^m}. \quad (6)$$

Сравнивая зависимости (2) и (6) видим, что $\sigma = \tau_n / A^{1/m}$.

Характеристическое время процесса сушки σ , полученное при обработке опытных данных, также приведено в Таблице 1. По найденным значениям σ и m по уравнению (1) проведены все кривые для различных температур на Рис. 1. При рассмотрении кинетических кривых для различных температур видно, что отсутствует ярко выраженный первый период сушки и всю зону кинетики занимает второй период, что характерно при лимитировании внутренней задачи сушки.

Таблица 1.

Параметры сушки зерна

Температура воздуха t , °C	Обозначение опытных точек	Характеристическое время сушки σ , мин
60	o	58
70	+	44
80	□	34
90	◇	25
100	●	20
110	■	17
120	▲	15

Согласование опытных значений кинетики и расчетных кривых, представленных на Рис. 1 очень хорошее, следовательно, МКМ хорошо описывает кинетику процесса сушки зерна.

w , %

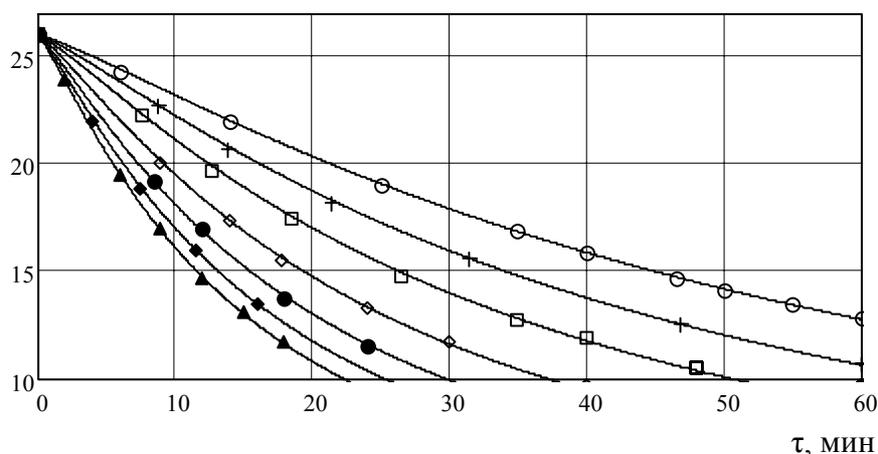


Рис. 1. Кинетические кривые сушки зерна пшеницы [6] при различных температурах.

Из анализа данных Таблицы 1. следует также, что значения характеристического времени процесса изменяются обратно пропорционально значениям температуры горячего воздуха. Эта графическая зависимость представлена на Рис. 2. Форма эмпирической кривой оказалась близкой к уравнению второй степени и поэтому она была обработана в форме квадратного уравнения, представленного ниже

$$\sigma = 14,5 + 0,0116 \cdot (t - 121)^2, \text{ мин.} \quad (7)$$

Кривая на Рис. 2 проведена по зависимости (7), она хорошо согласуется с полученными значениями характеристического времени процесса (табл. 1) и может быть рекомендована для расчетов процессов сушки при других температурах. Зависимость (7) использована

также при построении обобщающих графиков сушки пшеницы при различных температурах, приведенных ниже (Рис. 3 и 4).

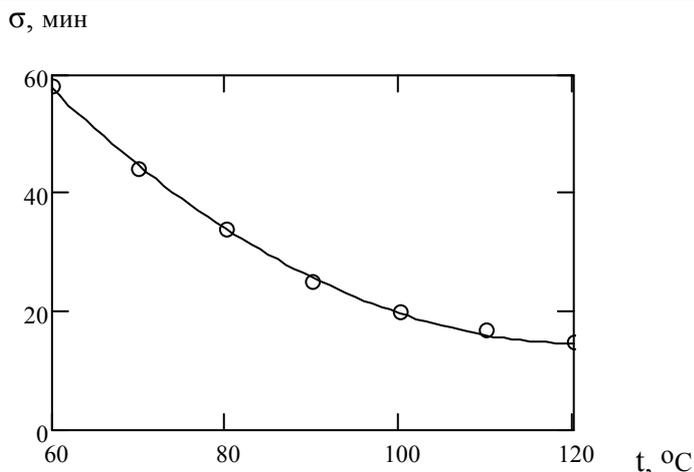


Рис. 2. Эмпирическая зависимость характеристического времени процесса сушки от температуры горячего воздуха.

На Рис. 3 приведена зависимость для безразмерного влагосодержания сушки пшеницы при различных температурах по данным [4] от безразмерного времени сушки τ/σ , согласно уравнению (2). Опытные значения при различных температурах хорошо укладываются на единую безразмерную кинетическую кривую, построенную на основе уравнения (1). Эта кривая представляет собой кривую обобщенной кинетики сушки.

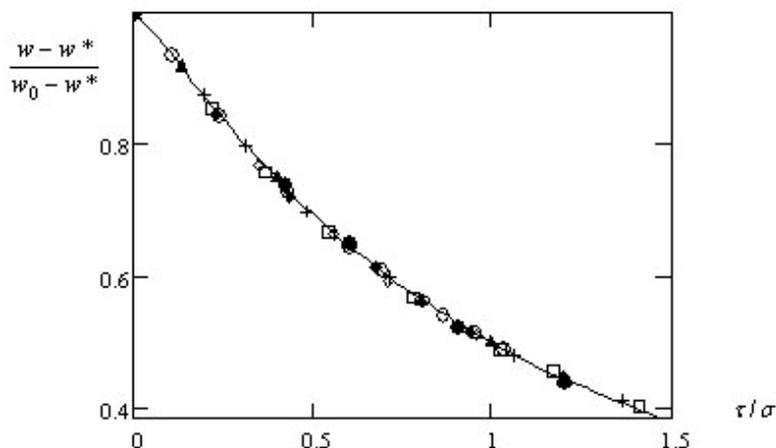


Рис. 3. Обобщающая зависимость для безразмерного влагосодержания сушки пшеницы при различных температурах по данным [4] от безразмерного времени сушки τ/σ .

На Рис. 4 приведена линеаризация по уравнению (3) при его логарифмировании тех же опытных данных, что были представлены выше.

$$\ln\left(\frac{w_0 - w^*}{w - w^*} - 1\right) = m \cdot \ln\left(\frac{\tau}{\sigma}\right) \quad (8)$$

Согласование опытных данных, представленных на Рис.4 с расчетом по уравнению (8) также хорошее. Линеаризация этой зависимости для каждой конкретной температуры позволяет методом НК определить конкретные кинетические параметры сушки σ и m . Зависимость (8) представленная в безразмерном виде на Рис. 4 также представляет собой кривую обобщенной кинетики сушки.

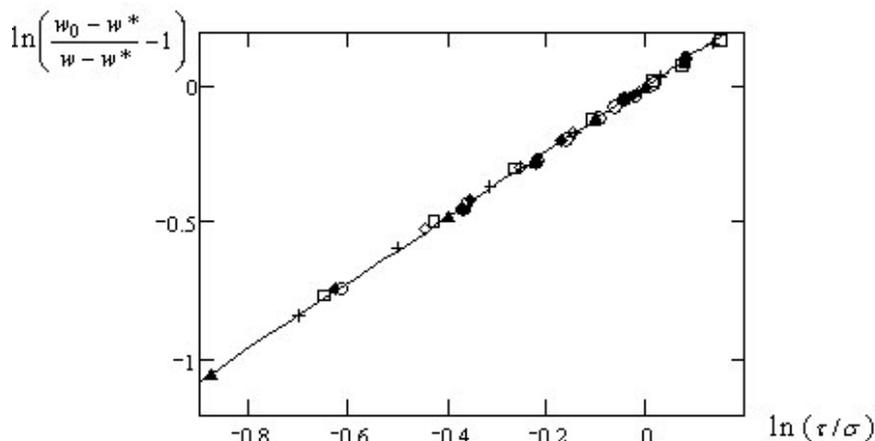


Рис. 4. Линеаризация опытных данных для безразмерного влагосодержания сушки пшеницы при различных температурах по уравнению (3).

При анализе выполненной обработки опытных данных для сушки зерен пшеницы при различных температурах можно сделать вывод, что МКМ может успешно использоваться для описания кинетики сушки при использовании минимума экспериментальных данных (для каждой температурной кривой достаточно одной экспериментальной точки), а также в качестве обобщающей и линеаризирующей зависимости кинетики сушки.

Литература

1. Levenspiel O. Chemical reaction engineering. John Wiley and sons, inc. New York-London, 1965. 612 p.
2. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 205 с.
3. Ефремов Г.И. Модифицированный квазистационарный метод описания кинетики сушки гигроскопичных материалов // ИФЖ. 1999. Т. 72, № 3. С. 420-424.
4. Ефремов Г., Марковски М., Бялобрзевски И. Макрокинетика процессов сушки. М.: Изд. МГОУ, 2009. 335 с.
5. Efremov G., Kudra T. Drying kinetics in a pulsed-fluid bed dryer -A modified quasi-stationary approach // Proceedings of International Conference "Energy-saving technologies for drying and hydrothermal processing". Moscow, 2002. V. 3. P. 70-73.
6. Лурье М.Ю. Сушка зерна в неподвижном слое и ее влияние на всхожесть, Известия ВТИ, № 5 (48), 1929.