

УДК 66.011

ЕФРЕМОВ Г.И.

Московский государственный открытый университет, Россия

КИНЕТИКА СУШКИ НАРЕЗКИ ЯБЛОК В СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ

Розглянуто можливість використання модифікованого квазістаціонарного методу для описання кінетики сушіння харчових матеріалів у сушарці з тепловим насосом при зберіганні сталого об'єму в процесі сушіння та з усадкою. Отримано рівняння для розрахунку основних параметрів процесу, поточного та безрозмірного вологовмісту, швидкості сушіння, коефіцієнта лінійної усадки, мінералізації та узагальнення дослідних даних. Метод перевірено шляхом порівняння з експериментальними даними щодо сушіння нарізаних яблук у сушарці з тепловим насосом.

Рассмотрена возможность модифицированного квазистационарного метода для описания кинетики сушки пищевых материалов в сушилке с тепловым насосом при сохранении постоянного объема в процессе сушки и с усадкой. Получены уравнения для расчета основных параметров процесса, текущего и безразмерного влагосодержания, скорости сушки, коэффициента линейной усадки, линеаризации и обобщения опытных данных. Метод проверен путем сравнения с экспериментальными данными по сушке нарезанных яблук в сушилке с тепловым насосом.

The application of modified quasistationary method (MQM) for the description of drying kinetics of food materials in a dryer with the heat pump is considered. It is considered the drying of materials, as at preservation of constant volume of material in drying process, and with shrinkage. The equations for calculation of the basic parameters of current and dimensionless moisture content, drying rate, factor of linear shrinkage, also linearization and generalizations of the experimental data are obtained. The method is checked up by comparison with experimental data on drying of apples cut into cubes in a dryer with the heat pump.

k – степень усадки;
 m – индекс гидродинамической активности;
 N – скорость сушки;
 V – объем материала;
 X – влагосодержание;
 τ – время;
 ρ – плотность материала;
 σ – характеристическое время.
 МКМ – модифицированный квазистационарный метод;

Индексы:
 E – равновесный;
 EV – равновесный при постоянном объеме;
 R – безразмерное влагосодержание;
 S – сухая масса;
 V – постоянный объем;
 0 – начальное состояние.

Сушка – энергоемкий процесс. В различных производствах на сушку затрачивается от 20 до 70 % и выше энергии технологического цикла. С целью интенсификации процесса сушку выгоднее проводить при достаточно высокой температуре, однако многие пищевые материалы чувствительны к высоким температурам и требуют мягких режимов сушки. Одно из современных направлений энергосбережения при сушке основано на применении тепловых насосов. При этом используются мягкие режимы сушки, сокращается потребление энергии и, вследствие герметизации установок, устраняются выбросы, загрязняющие окружающую среду.

Однако кинетика сушки с тепловым насосом сравнительно мало изучена. Сушка пищевых материалов осложняется также их усадкой в процессе сушки. В литературе практически отсутствуют надежные методы расчета процесса сушки с усадкой материала. Сказанное показывает актуальность рассматриваемой в работе проблемы.

Целью данной работы является изучение кинетики сушки пищевых материалов на примере нарезки яблук с учетом их усадки в сушилке с тепловым насосом, и разработка математической модели для описания этой кинетики. Математическая модель для рассматриваемой системы по-

лучена на основе ранее разработанного для сушки при преобладании внутренней диффузии модифицированного квазистационарного метода.

Сушилки с тепловым насосом рациональнее используют подводимую теплоту. Теплота, выходящего из сушильной камеры воздуха, выделяется в конденсаторе теплового насоса и используется для нагревания входящего в сушилку воздуха. Обычно сушилки с тепловым насосом имеют полную или частичную рециркуляцию сушильного агента.

1. Модифицированный квазистационарный метод

Задачей данной работы была разработка математической модели для описания кинетики сушки материалов с учетом их усадки в сушилках с тепловым насосом. К таким материалам относятся, прежде всего, пищевые материалы, например, различные виды ягод, фруктов, овощей и корнеплоды. Математическое описание кинетики сушки для такой системы может быть получено на основе разработанного ранее автором модифицированного квазистационарного метода [1].

Впервые квазистационарный метод (или метод равнодоступной поверхности) был предложен в работе [2] для упрощенного описания макрокинетики нестационарного массопереноса и использован применительно к химической кинетике. Квазистационарный метод предполагает, что вся поверхность обрабатываемого материала является равнодоступной в диффузионном отношении. Это, в частности, реализуется при диффузии в изотропной среде для материалов с изотропными свойствами. Квазистационарный метод объединяет результаты интегрирования уравнения диффузии с простым граничным условием (постоянная концентрация на поверхности материала) с кинетикой химической реакции первого порядка, как две стадии общего кинетического процесса. Квазистационарный метод упрощает кинетические расчеты и, что очень важно, позволяет выявить предельные случаи кинетики.

В работах [3-5] предложена модификация квазистационарного метода, заключающаяся во введении характеристического времени σ и индекса гидродинамической активности m в уравнение процесса. Недостатком ранее предложенного метода МКМ является то, что он не учитывал усад-

ку материала (сушка при постоянном объеме). Основное уравнение процесса сушки по МКМ для текущего влагосодержания X при постоянном объеме материала имеет вид [1]

$$X = \frac{X_0 - X_{EV}}{1 + \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m} + X_{EV} . \quad (1)$$

Для нахождения кинетических параметров σ и m этого уравнения при обработке экспериментальных данных удобно использовать его линеаризацию, выполненную путем логарифмирования, в виде

$$\frac{X_0 - X_{EV}}{X - X_{EV}} - 1 = \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m . \quad (2)$$

Линеаризация кинетической зависимости позволяет методом линейной регрессии найти искомые параметры сушки. Уравнение (2) является безразмерным и может быть использовано для обобщения опытных данных по сушке различных материалов в различных режимах сушки.

Скорость сушки по МКМ [1] рассчитывается по уравнению

$$N = \frac{m(X_0 - X_{EV}) \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^{m-1}}{\sigma \left[1 + \left(\frac{\tau}{\sigma}\right)^m\right]^2} . \quad (3)$$

2. Расчет кинетических параметров МКМ при сушке с учетом усадки

Расчет изменения плотности материала при сушке без изменения его объема может быть выполнен по известному его влагосодержанию X из соотношения

$$X = \frac{\rho_V}{\rho_s} - 1 . \quad (4)$$

Очевидно, что в этом случае зависимости влагосодержания и текущей плотности от времени (4) имеют аналогичный вид, т.е. плотность материала уменьшается во времени сушки. Соответственно равновесная плотность материала из уравнения (4) может быть записана как

$$\frac{\rho_{EV}}{\rho_s} = X_{EV} + 1 . \quad (5)$$

При реальной сушке многие материалы дают усадку до 50 % и более от их первоначального объема. Равновесная плотность материала при усадке ρ_E определяется аналогично уравнению (5) по реальному влагосодержанию X_E

$$\frac{\rho_E}{\rho_s} = (X_E + 1) . \quad (6)$$

Если объем материала при сушке до равновесного состояния уменьшился в 2 раза, то реальная плотность возросла также в 2 раза (в общем случае в k раз). Таким образом, реальная плотность ρ может быть в k раз больше плотности материала при постоянном объеме ρ_V . Реальное влагосодержание X и влагосодержание при постоянном объеме X_V также могут значительно отличаться. Так, если при состоянии равновесия реальное влагосодержание $X_E = 0,02$ и при этом объем материала снижается в 2 раза ($k = 2$), то при элементарном расчете по уравнениям (5) и (6) равновесное влагосодержание при постоянном объеме составит $X_{EV} = -0,49$. Таким образом, при наличии усадки равновесное влагосодержание при постоянном объеме $X_{EV} < X_E$ и может быть даже отрицательным по МКМ, а числовое значение X_{EV} количественно отражает степень усадки. Необходимо отметить также, что при наличии усадки безразмерное влагосодержание по МКМ будет кажущимся. С учетом изложенного, реальное безразмерное влагосодержание X_R может быть определено с учетом текущего влагосодержания X по уравнению (1) и реального равновесного влагосодержания X_E по уравнению

$$\frac{X - X_E}{X_0 - X_E} = \frac{\frac{X - X_{EV}}{1 + (\tau/\sigma)^m} + X_{EV} - X_E}{X_0 = X_E} . \quad (7)$$

В процессе сушки с усадкой материала уменьшается его объем и повышается плотность. При этом одни авторы [6] отмечают, что имеет место линейное уменьшение объема, а другие [7] отмечают линейный рост плотности при сушке. Рассмотрим наиболее часто встречающееся линейное уменьшение объема материала в процессе сушки. На основании уравнений (3-5) соотношение начального объема V_0 и объема при равновесном влагосодержании V_E (коэффициент усадки) составит

$$k = \frac{V_0}{V_E} = \frac{X_E + 1}{X_{EV} + 1} . \quad (8)$$

При линейном уменьшении объема материала в процессе сушки соотношение (8) сохраняется в течение процесса сушки. Тогда текущее изменение объема, с учетом времени τ_E , соответствующего достижению равновесного влагосодержания материала, составит

$$k = 1 + \frac{X_E - X_{EV}}{X_{EV} + 1} \cdot \frac{\tau}{\tau_E} . \quad (9)$$

В соответствии с уравнениями (1) и (9) пересчет опытных значений при линейном уменьшении объема материала составит

$$\frac{V_0}{V} = \frac{X_E + 1}{\frac{X_0 - X_{EV}}{1 + (\tau/\sigma)^m} + X_{EV} + 1} + 1 . \quad (10)$$

3. Сопоставление расчета с экспериментом

Описанный выше метод расчета был проверен путем сравнения с экспериментом по сушке нарезанных яблок в сушилке с тепловым насосом [8]. Образцы яблок в форме куба размером 6×6×6 или 12×12×12 мм, с содержанием сухой массы 12% высушивали в лабораторной конвективной сушилке с тепловым насосом до конечного влагосодержания 16 %. Нарезанные образцы были равномерно распределены на подносе, помещенном в сушильную камеру, где они были подвергнуты сушке конвективным потоком сушильного агента, циркулирующего поперек плоскости подноса через отверстия в нем. В поднос загружали 245 кг продукта, с удельной загрузкой 15 кг/м². Количество воды, испаряемое в течение сушки, измерялось с помощью весов, к которым был подвешен поднос. Температуру сушильного агента в камере измеряли посредством электронного термометра с 8 каналами, а скорость агента анемометром с диаметром трубки 15 мм.

Ниже приведены результаты выполненной математической обработки экспериментальных данных [8] по сушке нарезанных яблок в сушилке с тепловым насосом по приведенным уравнениям, полученными на основе МКМ.

На рис. 1 представлены расчетные кинетические и экспериментальные значения при сушке кубиков яблок 6×6×6 мм [8] с учетом усадки при сушке по уравнению (7) и при сохранении посто-

Табл. Параметры сушки нарезки яблок

Параметр сушки	X_0 , кг/кг	X_E , кг/кг	X_{EV} , кг/кг	m	σ , мин
Значение	7,0	0,01	-0,47	1,54	28,3

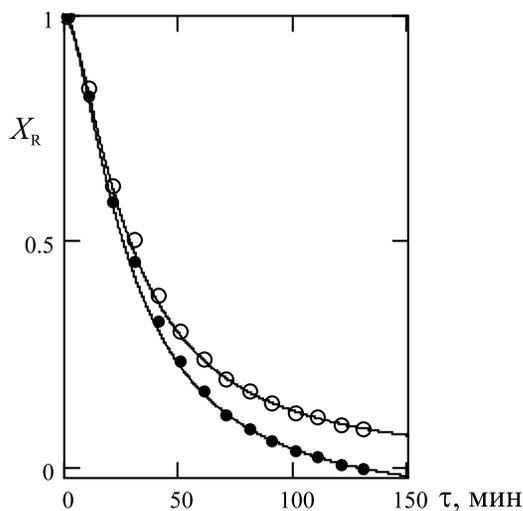


Рис. 1. Кинетические кривые сушки нарезки яблок для безразмерного влагосодержания по уравнению (7) при наличии усадки (●) и при сохранении постоянного объема материала (○) по МКМ.

янного объема материала по МКМ. Из рисунка следует, что линия и опытные значения для сушки при сохранении постоянного объема материала лежат значительно выше реальных значений влагосодержания, что подтверждает необходимость корректировки данных при наличии усадки в процессе сушки материала. Используемые в расчете параметры сушки m и σ приведены в табл.

На рис. 2 представлена зависимость скорости сушки яблок от влагосодержания, построенная по уравнению (3) с учетом параметров сушки (табл.) и приведены экспериментальные значения [8]. Скорость от нулевого значения быстро достигает максимума при X около 5 кг/кг, а затем более плавно понижается до значения около нуля при влагосодержании близком к равновесному. Из рис. 1 и 2 следует, что МКМ хорошо описывает экспериментальные точки по скорости нарезки яблок с усадкой в процессе сушки.

На рис. 3 представлены результаты линейаризации опытных значений кинетики сушки яблок пересчитанных по уравнению (2), полученному на основе МКМ. Представленный на рис. 3 график подтверждает линейность зависимости и показы-

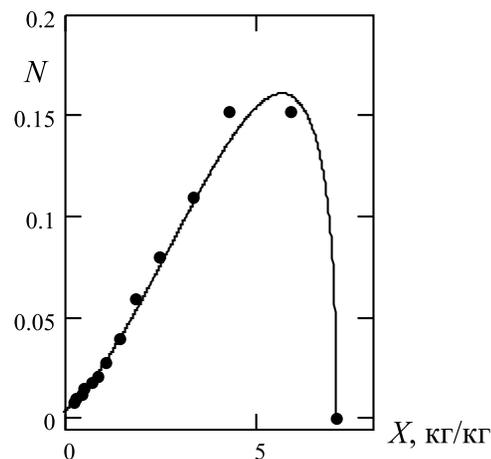


Рис. 2. Зависимость скорости сушки нарезки яблок по уравнению (3) от влагосодержания. Опытные точки работы [8].

вает хорошее согласование расчета с экспериментом. Линейаризация позволяет также выполнить расчёт параметров сушки m и σ , соответственно, как тангенс угла наклона прямой и по значению отрезка, отсекаемого прямой на оси ординат.

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента усадки от времени при сушке нарезки яблок, рассчитанная по уравнению (9). Значения экспериментальных точек пересчитаны из значений кинетики сушки по уравнению (10). Из рис. 4 следует, что уравнение (9) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные по сушке с усадкой материала.

4. Выводы

1. Модифицированный квазистационарный метод, при выполнении необходимой корректировки, позволяет описать кинетику сушки материалов с учетом их усадки. Получены уравнения для расчета основных параметров процесса, текущего и безразмерного влагосодержания, скорости сушки, коэффициента линейной усадки, а также уравнение для линейаризации и обобщения опытных данных.

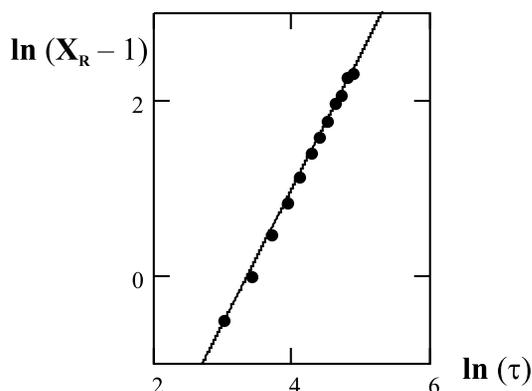


Рис. 3. Линеаризация опытных значений для кинетики сушки нарезки яблок по уравнению (2), полученному на основе МКМ.

2. При рассмотрении, в качестве примера, кинетики сушки нарезки яблок в сушилке с тепловым насосом, найдено, что МКМ хорошо описывает кинетику сушки материалов как при постоянном объеме, так и с их усадкой. Метод может быть рекомендован для обработки экспериментальных данных по кинетике сушки с усадкой материалов в сушилках различного типа, включая сушилки с тепловым насосом. Планируется его дальнейшая экспериментальная проверка и обобщение на его основе опытных данных для сушки различных материалов с усадкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ефремов Г.И.* Макрокинетика процессов переноса. Москва, Изд. МГТУ, 2001, 289 с.
2. *Франк -Каменецкий Д.А.* Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.; Наука, 1987, 490 с.
3. *Ефремов Г.И.* Модифицированный квазистационарный метод описания кинетики сушки гигроскопичных материалов // ИФЖ, 1999, Т.72, №3, С. 420-424..
4. *Efremov G., Kudra T.* Drying Kinetics in a Pulsed-Fluid Bed Dryer-A Modified Quasi-Stationary

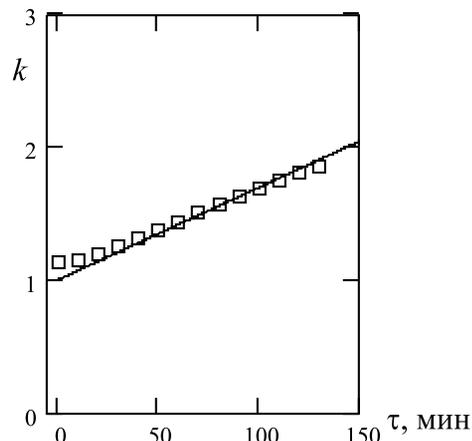


Рис. 4. Расчет коэффициента усадки при сушке яблок по уравнению (8), полученному на основе МКМ.

Approach. Proceeding of 1-st International Conference «Energy-Saving Technologies for Drying and Hygro-Thermal Processing»// М.: 2002, V. 3, P. 70-73.

5. *Ефремов Г. И., Журавлева Т.Ю., Нефедова Н.Е.* Квазистационарная кинетика работы теплового насоса, Труды межд. конф. “Теплофиз. измерения при контроле и управлении качеством”, 20-24 сентября 2004, г. Тамбов. С. 253-254.

6. *Timoumi S., Mihoubi D, and Zagrouba F.* Dehydration of Apple Slices; Dehydration kinetics and Quality Changes. Proceeding of the joint conference AFSIA, Drying Working group EFCE at INA P-G. Paris 12-13 May, 2005. P. 74-75.

7. *Bialobrzewski, I., & Markowski, M.,* Mass transfer in the celery slice: effects of temperature, moisture content, and density on water diffusivity // Drying Technology, 2004. V.22, № 17. P. 1777-1789.

8. *Hristov H., Penov N., Dichev S.* Process kinetics investigation in low temperature drying of apples in heat pump drier // Advances in Drying Technology. Proceeding of the Symposium EUODrying – 03, Heraclion, Crete, Greece. September 4-5, 2003. P. 207-215.

Получено 30.08.2005 г.