

МЕТОДЫ ОБОБЩЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПРОЦЕССАХ СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Розглянуто методи узагальнення процесів сушіння для вологих дисперсних систем. Запропоновано вдосконалену класифікацію вологих харчових продуктів, яка базується на їх основних тепло- та масообмінних властивостях. Узагальнення конвективного сушіння бурякового жому дають змогу отримати криві сушіння для довільного значення початкової вологості при двох відомих експериментальних кривих сушіння.

Рассматриваются методы обобщения процессов сушки для влажных дисперсных систем. Предложена усовершенствованная классификация влажных пищевых продуктов, основанная на их основных тепло- и массообменных свойствах. Обобщение конвективной сушки свекловичного жома позволяют получить кривые сушки для произвольной начальной влажности при двух известных экспериментальных кривых сушки.

We developed a generalization methods for drying of damp disperse materials. We also offered the advanced classification of damp foodstuff, based on their basic warm-, mass- exchange properties. The generalization of konvective drying for sugar beet-pulp allows receiving of drying curves for any initial moisture content from two exsperimental drying curves.

N – скорость сушки первого периода;
 Q – количество теплоты;
 r – теплота фазового превращения;
 u – влагосодержание;
 q – удельное количество теплоты;

t – время.

Индексы:

o – начальная величина;
 k – конечная величина;
 x – текущая величина.

Разнообразие пищевых продуктов и их тепло- и массообменных характеристик требует проведения широкомасштабных трудоемких экспериментов при исследовании процессов сушки. Поэтому разработка методов обобщения таких процессов для влажных дисперсных материалов имеет большое теоретическое и практическое значение.

С целью обобщения процессов сушки была разработана классификация влажных пищевых продуктов исходя из их основных тепломассообменных свойств [1]. В качестве основных определяющих свойств были приняты количество компонентов системы, их агрегатное состояние и характер взаимодействия частиц дисперсной фазы.

Приведенная классификация дает возможность отдельные продукты из разных групп рассматривать как эталонные и зная рациональные режимы их сушки прогнозировать режимы обработки и для других продуктов этой группы.

При дальнейших исследованиях процессов сушки многих пищевых продуктов установлено, что они достаточно хорошо вписываются в эту классификацию. Однако при исследовании сушки свекловичного жома было установлено, что по своим физико-химическим свойствам он не вписывается ни в одну

из групп материалов классификационной таблицы. При экспериментах с образцами жома сахарной свеклы, которые рассматривались нами как представители связнодисперсных сильноструктурированных систем, выяснился ряд особенностей. При изучении массопереноса в процессах сушки в сильноструктурированных материалах, отнесенных к группе мало-пористых, установлено, что одни продукты обладают сравнительно небольшой усадкой и растрескиваются (макарон), другие, имея значительную усадку, не растрескиваются. К последним можно отнести продукты растительного происхождения. Основу их клеточного строения составляет протоплазма (вакуоли с клеточным соком), которая имеет сложную наружную клеточную оболочку, образующую твердый каркас (форму) клетки. Клеточная оболочка содержит ферменты, способствующие переносу веществ из внешней среды к внутренним слоям клетки путем превращения веществ, нерастворимых в мембранах, в растворимые. Оболочка клетки обладает свойством полупроницаемости, благодаря чему в клетку проникают жидкости с меньшей концентрацией растворенных веществ по сравнению с веществами клетки [2]. Материалы, которые растрескиваются во время сушки, не имеют классического кле-

точного строения, а состоят из мельчайших частиц, которые взаимодействуют между собой за счет ван-дерваальсовых сил. В растительных материалах осмотически связанная влага находится внутри клеток в полупроницаемых мицеллах. Осмотическое проникновение воды происходит без выделения теплоты и сжатия системы.

Осмотически связанная вода не отличается от обычной и при сушке перемещается внутри материала без фазового превращения — в виде жидкости. При более высокой концентрации растворимых веществ в наружных слоях материала влага осмотически диффундирует в эти слои через полупроницаемые стенки клеток. Таким образом, процесс удаления этой влаги аналогичен и противоположен осмотическому проникновению ее внутрь клеток.

Как видно из приведенного, движущими силами в процессе массопереноса сильноструктурированных малопористых материалов являются разные силы и механизм переноса влаги, которые имеют существенные различия, что вызывает необходимость разработки разных режимов сушки.

Таким образом, классификация влажных пищевых продуктов требует некоторого усовершенствования. На наш взгляд, ее необходимо дополнить с учетом приведенных выше фактов. Классификация влажных дисперсных материалов, отнесенных к группе связнодисперсных веществ изменит свой вид. В табл. 1 приведена часть классификационной таблицы связнодисперсных коагуляционных систем.

Приведенная классификация дает возможность рассматривать жом как эталонный и, зная рациональные режимы его сушки, прогнозировать режимы сушки и других продуктов этой группы.

Как показали дальнейшие экспериментальные исследования, продукты этой группы дают значительную усадку в процессе сушки. Однако, их растительные клетки обладают значительной эластичностью и вследствие этого усадка не приводит к образованию критических внутренних напряжений и трещин. Большое количество свободной влаги ($u_0 = 600-300\%$) и отсутствие опасности трещинообразования позволяет сушить их с приме-

нием высокоинтенсивных методов подвода энергии: конвективно-радиационные, конвективно-радиационные с применением соплового обдува и другие интенсивные методы подвода теплоты. Выбор оптимального режима требует проведения широкомасштабных экспериментов при исследовании процессов сушки. Использование методов обобщения кривых сушки дает возможность значительно сократить этот трудоемкий процесс. Использование низкотемпературных режимов для сушки связнодисперсных сильноструктурированных пищевых продуктов, обусловлено тем, что данные режимы позволяют получить качественный конечный продукт с наименьшими потерями вкусовых и ароматических свойств, что является очень важным для их дальнейшего использования.

По результатам проведенных экспериментов низкотемпературной сушки жома сахарной свеклы, построены обобщенные кривые в координатах $u = f(Nt)$ при разных начальных влагосодержаниях u_0 (рис. 1). Опыты показали, что соотношение $Nt = \text{const}$ дает достаточно точное совпадение расчетных и экспериментальных данных как в периоде постоянной скорости, так и в периоде падающей скорости сушки. В диапазоне комплексной величины Nt от 0 до 500, экспериментальные данные практически совпадают с расчетными кривыми. В дальнейшем наблюдается некоторое отклонение от обобщенной кривой в 3 %, что находится в пределах допустимой точности. Максимальное отклонение наблюдается в конце процесса сушки и составляет 6 %.

С другой стороны, обобщение $Nt = \text{const}$ можно представить в дифференциальной форме [3] как

$$\frac{du}{dt} \tau = \text{const}. \quad (1)$$

В период постоянной скорости, когда удаляется свободная влага, величина теплоты фазового превращения r принимается постоянной; и, умножив уравнение (1) на $r/100$, получим

Таблица

Характер взаимодействия частиц дисперсной среды	Связнодисперсные (структурированные)				
	Коагуляционные				
Количество компонентов и их агрегатное состояние	Слабоструктурированные (порошкообразные)		Сильноструктурированные (твердоподобные)		
	Малая пористость	Большая пористость	Малая пористость		Большая пористость
			Растрескивающиеся	Не растрескивающиеся	
T+P+Г	Крахмал Картофельное пюре	Мука	Макаронные изделия	Растительные продукты	Сухари

$$\frac{r}{100} \cdot \frac{du}{d\tau} \cdot \tau = \text{const}, \quad (2)$$

где $\frac{r}{100} \cdot \frac{du}{d\tau} = dq$ – количество теплоты, которое расходуется на фазовые превращения за единицу времени и отнесенное к единице массы сухого вещества.

Как показали наши многочисленные опыты уравнение (2) дает достаточно точные результаты если процесс сушки идет в периоде постоянной скорости. Максимальное совпадение расчетных и экспериментальных данных наблюдается в том случае, когда в уравнении (2) учитывается вся теплота, которая расходуется во время сушки на нагрев и фазовые превращения. На рис. 2 приведены обобщен-

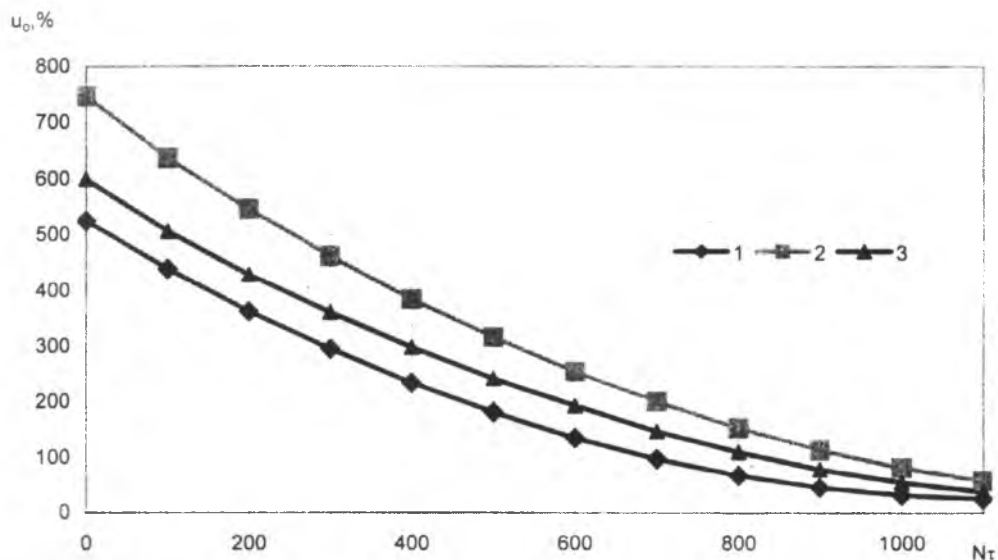


Рис. 1. Обобщенные кривые конвективной сушки жема $u = f(N\tau)$: 1 – 750 %; 2 – 600; 3 – 525.

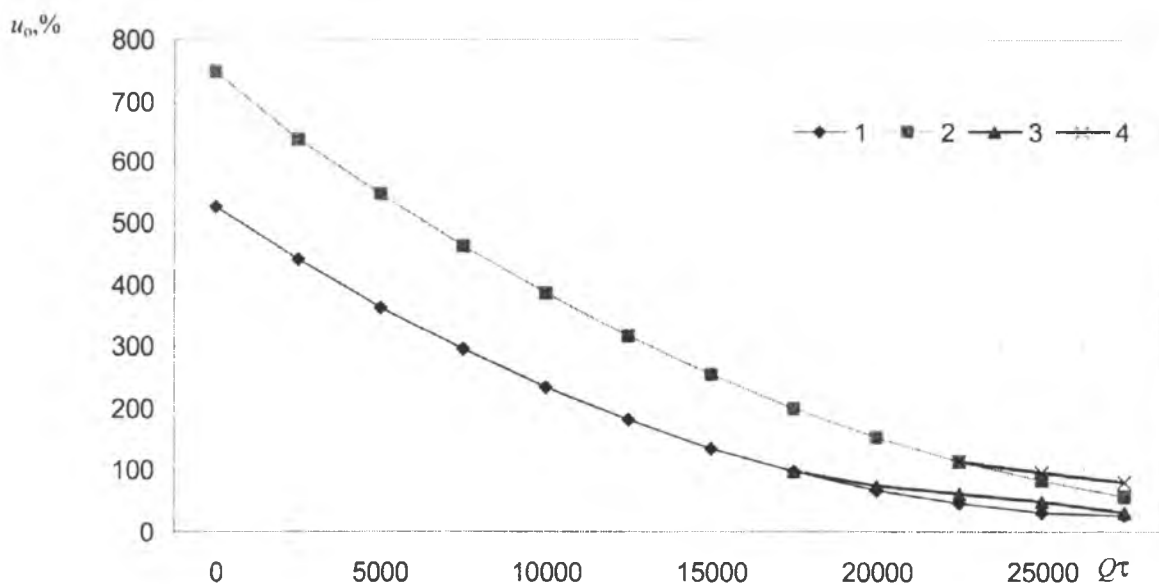


Рис. 2. Обобщенные кривые конвективной сушки жема $u = f(Q\tau)$: 1 – 750 %; 2 – 525; 3 – 750 с учетом расходов теплоты на преодоление связи влаги с материалом; 4 – 525 с учетом расходов теплоты на преодоление связи влаги с материалом

ные кривые в координатах $u = f(Q\tau)$ при разных начальных влагосодержаниях u_0 . Если процесс ведется в области связанной влаги, то необходимо учитывать расходы теплоты на преодоление связи влаги с материалом (8...10 %) кривые 3, 4 на рис. 2.

Таким образом, количество теплоты, отнесенное к единице массы сухого вещества, которое расходуется в процессах сушки на нагревание материала и фазовые превращения влаги, при условии, что сушка ведется при одинаковых начальных и конечных состояниях, есть величина постоянная и не зависит от режима сушки и способа подведения теплоты.

Математический анализ и обработка экспериментальных данных подтвердили, что с достаточной степенью точности можно использовать метод [3] для вычисления необходимого значения текущего влагосодержания u_x для данной группы продуктов:

$$u_x = u_1 + \frac{(u_{ox} - u_{ol}) \cdot (u_2 - u_1)}{u_{o2} - u_{o1}} \quad (3)$$

где u_{ox} , u_{ol} , u_{o2} – соответственно начальное влагосодержание для расчетного текущего влагосодержания и двух кривых сушки при фиксированном значении $N\tau$; u_1 , u_2 – соответственно поточное влагосодержа-

ние для двух кривых при тех же значениях $N\tau$. Кривая 2 (рис. 2) получена расчетным путем по уравнению (3). Отклонения экспериментальных и расчетных данных составляют до 7 %.

Таким образом, данные исследования позволят в дальнейшем подобрать рациональный режим сушки для жома сахарной свеклы и прогнозировать режимы сушки и других продуктов связнодисперсных сильноструктурированных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буляндра А.Ф., Бессараб А.С. Определяющие сушильные свойства пищевых продуктов и их классификация.- Пром. теплотехника.- 1990.- Т. 12.- № 6.- С. 18-24.
2. Филоненко Г.К., Гришин М.А. и др. Сушка пищевых растительных материалов.- М.: Пищевая промышленность, 1971.
3. Буляндра А.Ф. Научно-технические основы выбора рациональных режимов сушки и расчета сушильных установок пищевой промышленности: Диссертация на соиск. ученой степени док. техн. наук.- К.: 1978.- 487 с.- КТИПП.

Получено 15.05.2002 г.