УДК 664

Жабборов Исломбек Тўлқинжон ўғли
докторант (НГТУ., г Наманган)
Jabborov Islombek Tulkinjon ugli
doctoral student (NSTU, Namangan city)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕПЛО И МАССООБМЕНА ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЯБЛОК В РОТОРНОМ УСТРОЙСТВЕ

Аннотация: В данной статье освещены теоретические основы, математические выражения и методика экспериментальных исследований закономерностей тепло- и массообмена, происходящих в процессе конвективной сушки плодов яблони в роторной установке. Изменение скорости, направления воздушного потока в сушильной камере и его взаимодействия с поверхностью продукта в результате вращения ротора рассматриваются как факторы, влияющие на интенсивность тепло-и влагообмена. Методика исследования предусматривает учет температуры сушильного агента, скорости воздуха, частоты вращения ротора, толщины кусков яблок и продолжительности сушки. Для описания кинетики процесса предлагается использовать соотношение влажности, скорость сушки, коэффициент эффективной диффузии влаги и коэффициент теплообмена.

Ключевые слова: яблоко, роторная установка, конвективная сушка, теплообмен, массообмен, диффузия влаги, кинетика сушки, воздушный поток, математическое моделирование.

В промышленности по переработке фруктов и овощей одной из актуальных научно-технических задач является снижение влажности сырья, продление срока хранения продукции, максимальное сохранение ее пищевой ценности и эффективное использование энергоресурсов. Высокое содержание воды в свежих фруктах и овощах создает условия для ускорения микробиологических и биохимических процессов. В результате в процессе хранения качество продукта может снизиться, естественные потери увеличатся, а срок годности к употреблению сократится. Поэтому снижение влажности плодоовощной продукции путем сушки в контролируемых условиях является одним из важных технологических направлений хранения и переработки пищевых продуктов.

Эффективность процесса сушки определяется не только степенью снижения влажности в составе продукта, но и продолжительностью процесса, расходом тепла и электроэнергии, цветом, структурой, вкусом и сохранением биологически активных компонентов сушеного продукта. С этой точки зрения, совершенствование конструкции сушильных установок, управление движением сушильного агента и глубокое изучение процессов тепло-и массообмена между продуктом и воздухом имеет важное научно-практическое значение.

Яблоко (Malus domestica) - один из фруктов, широко используемых в пищевой промышленности, употребляемый в свежем виде и используемый для приготовления различных продуктов переработки. Его можно использовать для производства сушеных кусочков, порошков, полуфабрикатов и других пищевых компонентов. В результате сушки яблок содержание воды в продукте уменьшается, а доля сухих веществ на единицу массы увеличивается. Однако изменения температуры и влажности в процессе сушки могут влиять на физические свойства, цвет и текстуру плодовой ткани. Поэтому при сушке яблок необходимо определить технологические условия, позволяющие быстро снизить влажность, а также сохранить качество продукта.

Процесс сушки плодов яблони характеризуется сочетанием сложных явлений тепло- и массообмена. Нагретый воздух, выполняющий функцию сушильного агента, передает тепло на поверхность изделия. Часть этой теплоты расходуется на нагревание кусков яблок, а основная часть - на испарение влаги в соответствующих условиях. Часть воды в составе продукта перемещается из внутренних слоев на поверхность, затем испаряется и выводится из сушильной камеры потоком воздуха. Следовательно, скорость сушки определяется движением влаги внутри продукта, условиями испарения на поверхности продукта и выносом водяного пара в потоке внешнего воздуха.

В исследованиях по конвективной сушке яблочных кусочков экспериментально изучено влияние температуры, скорости воздуха, относительной влажности воздуха и толщины продукта на продолжительность сушки. Например, в исследовании, опубликованном в журнале Processes, кусочки яблок испытывались при температурах 60, 70 и 80 °C, скорости воздуха 1,9-3,1 м/с и толщине 6-10 мм. Результаты показали, что кинетика сушки зависит от совместного действия этих факторов. Однако эти условия нельзя принимать непосредственно оптимальными для роторной установки другой конструкции.

В качестве объекта исследования были выбраны плоды яблок, высушиваемые конвективным способом в роторной установке. Основной целью исследования является изучение закономерностей уменьшения влажности в составе яблок во времени, теплообмена между продуктом и сушильным воздухом, а также процессов переноса влаги внутри продукта. В опытах используются плоды яблони с одинаковой степенью зрелости, без механических повреждений и признаков гниения. Плоды яблок сначала моют, удаляют свободную воду с поверхности и разрезают на кусочки одинаковой толщины. Геометрические размеры и начальная масса образцов определяются до начала эксперимента.

Устройство и принцип работы роторного устройства. Роторная установка, используемая в исследовании, состоит из сушильной камеры, системы подачи воздуха, воздушного нагревательного элемента, роторного механизма, электропривода и контрольно-измерительных средств. Конкретный состав устройства определяется в соответствии с его конструктивным решением.

Сушильный воздух нагревается до заданной температуры и подается в сушильную камеру. В результате прохождения воздушного потока внутри камеры по поверхности кусков яблок тепло передается продукту. При нагревании продукта содержащаяся в нем влага испаряется и удаляется из зоны сушки при помощи воздушного потока.



Рис 1. Процесс конвективной сушки яблок, нарезанных кольцами, половинками и четвертинками.

При сравнении режимов работы устройства контролируются частота вращения ротора, температура воздуха и скорость воздуха. Если позволяет конструкция устройства, сравнивают при одинаковых условиях и режимы с ротором и без ротора.

В зависимости от вращения ротора или его конструкции может изменяться распределение воздушного потока, условия контакта поверхности продукта с воздухом и равномерность сушки. Действительный уровень этих воздействий определяется экспериментально.

Основные элементы роторного устройства и их функции.

Таблица-1.

№	*Элемент устройства*	*Основная функция*
1	Сушильная камера	Создание рабочего объема для сушки кусочков яблок
2	Система подачи воздуха	Подача сушильного воздуха в камеру
3	Нагревательный элемент	Повысить температуру воздуха до заданного значения
4	Роторный механизм	Вращение ротора или воздействие на поток воздуха в соответствии с конструкцией устройства
5	Электропривод	Обеспечение вращения ротора
6	Датчик температуры	Измерение температуры воздуха или продукта
7	Анемометр	Измерение скорости воздуха
8	Тахометр	Определение частоты вращения ротора
9	Весы лабораторные	Определение массы образца
10	Рекордер времени	Регистрация продолжительности сушки

Определение изменения влажности яблок. Одним из основных показателей в процессе конвективной сушки яблок в роторной установке

является изменение влажности продукта во времени. В процессе сушки часть свободной и связанной влаги в яблоке испаряется, что приводит к уменьшению общей массы продукта. Для анализа этого процесса сначала определяются массы влажного и сухого вещества.

Если начальная масса яблока перед сушкой обозначается как m_0, а начальная влажность W_0, то масса сухого вещества в составе продукта рассчитывается следующим образом:

$$m_d = m_0 \left(1 - \frac{W_0}{100}\right) \quad (1)$$

здесь m_d - масса сухого вещества, кг; m_0 - начальная масса яблока, кг; W_0 - начальная влажность, %. Масса сухого вещества принимается постоянной в процессе сушки. Эта гипотеза применима к тому случаю, когда испарение воды из яблок происходит без значительных потерь других веществ.

Если масса продукта равна m_t в любой момент t сушки, масса воды в этот момент находится по следующему выражению:

$$m_{w,t} = m_t - m_d \quad (2)$$

Следовательно, разница между текущей массой продукта и массой сухого вещества выражает количество воды, оставшейся в его составе. Знание этого значения позволяет оценить снижение влажности на разных этапах процесса сушки.

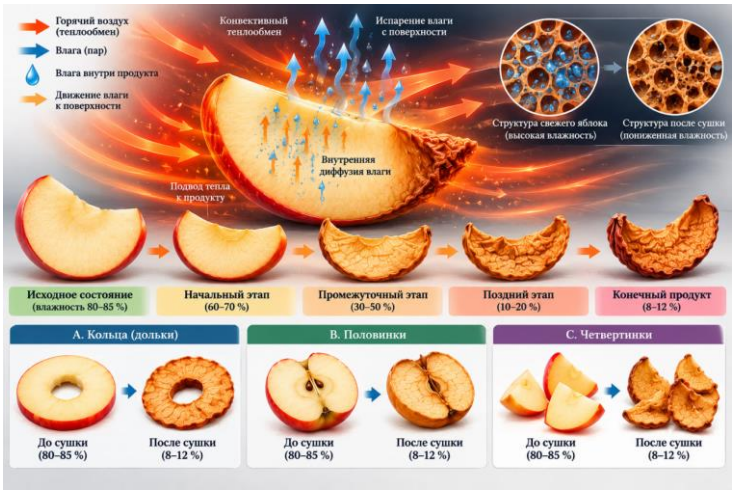

Рис 2. Физические механизмы тепло и массопереноса при конвективной сушке яблочных долек различной формы.

Текущая влажность яблок на влажной основе рассчитывается следующим образом:

$$W_t = \frac{m_t - m_d}{m_t} \cdot 100\% \quad (3)$$

здесь W_t - влажность в момент времени t, %. В результате уменьшения m_t во время сушки W_t также уменьшается. Однако скорость уменьшения влажности во времени может быть не постоянной: условия тепло и массообмена на начальных и последующих этапах процесса различаются.

Оценка влияния вращения ротора и воздушного потока. Положение и движение продукта в роторной установке с переменным воздушным потоком может влиять на условия тепло-и массообмена с воздухом. Угловая скорость ротора определяется из частоты вращения следующим образом:

$$\omega = \frac{2\pi n_r}{60} \quad (4)$$

здесь ω - угловая скорость ротора, рад/с; n_r - частота вращения ротора, об/мин. Линейная скорость точки, расположенной на расстоянии r от оси вращения ротора:

Количество конвективного тепла, передаваемого продукту в течение общей продолжительности сушки, выражается следующим образом:

$$Q_c = \int_0^{t_f} h\,A(T_a - T_s)dt \quad (5)$$

здесь Q_c - тепловая энергия, передаваемая в процессе сушки, Дж; t_f - конечное время сушки, с. Если значения h, A, T_a и T_s принимаются практически постоянными на протяжении всего процесса, интеграл упрощается:

Для описания движения влаги внутри яблока можно использовать второй закон Фика. В общем виде она записывается следующим образом:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\text{eff}} \nabla X) \quad (6)$$

здесь D_{eff} - коэффициент эффективной диффузии влаги, м^2/с; X - влажность на сухом основании; t - время, с; ∇ - оператор пространственного градиента. Данное уравнение описывает, как изменяется распределение влаги внутри продукта во времени.

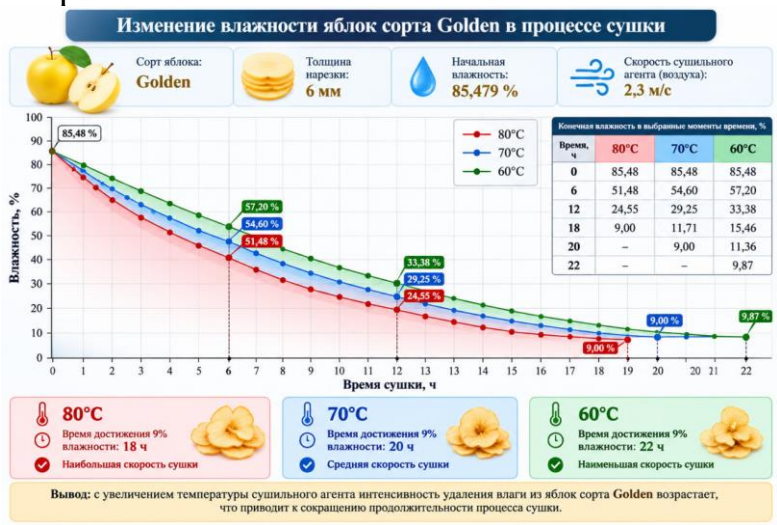

Рис 3. Изменение влажности яблок сорта Golden в процессе сушки.

Приведенные выше уравнения позволяют проанализировать процесс конвективной сушки плодов яблони в роторной установке с точки зрения влажностного баланса, кинетики сушки, теплообмена, внутренней диффузии влаги, внешнего массообмена и энергопотребления. Данные формулы составляют расчетную основу исследования, но сами по себе не являются экспериментальным результатом. В статье строгие выводы, такие как "вращение ротора ускорило сушку," "коэффициент диффузии увеличился" или "потребление энергии уменьшилось," следует писать только после подтверждения соответствующими измерениями или результатами проверенных расчетов.

На основе изучения закономерностей тепломассообмена в процессе конвективной сушки плодов яблони в роторной установке можно сделать следующие выводы.

1. Процесс конвективной сушки характеризуется конвективной передачей тепла на куски яблок, переносом влаги из внутренних слоев продукта на поверхность и испарением с его поверхности. Взаимосвязь этих процессов определяет скорость, продолжительность сушки и качественные показатели готовой продукции.

2. Геометрическая форма и размеры кусков яблок существенно влияют на эффективность сушки. Уменьшение толщины куска сокращает расстояние перемещения влаги изнутри продукта на поверхность. Поэтому условия выхода влаги при сушке яблок в форме кольца, разделенного на две или четыре части отличаются друг от друга. Однако для определения точной разницы продолжительности сушки необходимо провести экспериментальные исследования.

3. С уменьшением влажности продукта в процессе сушки меняются механизмы тепло-и массообмена. Если на начальном этапе важное значение имеет испарение поверхностной влаги, то на последующих этапах диффузия влаги из внутренних слоев продукта на поверхность может ограничить скорость процесса. По этой причине на всех этапах сушки может не наблюдаться одинаковая скорость выделения влаги.

4. Использование роторного устройства с переменным потоком воздуха позволяет управлять воздухообменом вокруг кусков яблок, регулировать температуру и скорость воздуха в зоне сушки, а также уменьшить скопление влажного воздуха на поверхности продукта. При этом скорость вращения ротора, скорость воздушного потока, температура сушильного агента и толщина слоя продукта должны быть согласованы между собой.

5. При количественной оценке процесса сушки целесообразно использовать такие показатели, как изменение влажности продукта во времени, скорость выделения влаги, изменение соотношения влаги, коэффициент эффективной диффузии влаги и затраченная на сушку энергия. Эти параметры служат основой для разработки математической модели процесса сушки и оптимизации режимов работы устройства.

6. Для сохранения качества яблочного продукта необходимо выбирать режим сушки не только на основе критерия быстрого снижения влажности, но и с учетом таких показателей, как цвет, структура, вкус, способность к повторному увлажнению и энергопотребление. Наиболее оптимальный технологический режим должен определяться по результатам эксперимента.

В целом, исследование процесса конвективной сушки плодов яблони в роторной установке с переменным потоком воздуха на основе закономерностей тепло-и массообмена позволяет разработать технологические решения, направленные на повышение эффективности сушки, равномерное снижение влажности продукта и снижение энергопотребления. Для этого важно экспериментально определить влияние формы и размера среза кусков яблок, температуры и скорости сушильного

агента, а также режима вращения ротора на кинетику сушки и качество готовой продукции.

Список литературы:

1. Лыков А.В. *Теория сушки*. - Москва: Энергия, 1968. - 472 с.
2. Лыков А.В. *Тепло- и массообмен в процессах сушки*. - Москва: Государственное энергетическое издательство. - 464 с.
3. Гинзбург А.С. *Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности*. - Москва: Агропромиздат, 1985. - 336 с.
4. Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденберг Я.М. и др. *Сушка пищевых растительных материалов*. - Москва: Пищевая промышленность, 1971. - 440 с.
5. Широков Е.П. *Технология хранения и переработки плодов и овощей*. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва: Колос, 1978. - 312 с.
6. Казаков А.П. *Технология сушки пищевых продуктов*. - Москва: Пищевая промышленность.