УДК 664

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

ТЕПЛОМАССООБМЕН, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ЯБЛОК В ВЕРТИКАЛЬНОЙ РОТОРНОЙ СУШИЛКЕ

Аннотация: Данное исследование посвящено изучению закономерностей тепло-и массообмена процесса конвективной сушки яблок в сушилке с вертикальным ротором, формированию математической модели процесса и оптимизации технологических параметров. Процесс сушки рассматривается на основе принципов теплопередачи, массообмена, гидродинамики и математического моделирования процессов химической технологии. Миграция влаги внутри продукта описывается вторым законом Фика, температурное поле - уравнением теплопроводности, а процессы на поверхности продукта - граничными условиями конвективного тепло-и массообмена. Температура, скорость и влажность сушильного агента, частота вращения ротора и толщина кусков яблок определяются как основные технологические факторы. Для описания кинетики сушки разработана методика использования соотношения влажности, скорости сушки, коэффициента эффективной диффузии влаги и уравнения Аррениуса.

Ключевые слова: сушилка с вертикальным ротором, яблоко, конвективная сушка, теплообмен, массообмен, эффективный коэффициент диффузии, кинетика сушки, математическая модель, гидродинамика, энергоэффективность, оптимизация.

В настоящее время продление срока хранения сельскохозяйственной продукции, максимальное сохранение ее пищевой ценности и повышение эффективности переработки являются одними из актуальных научно-технических вопросов пищевой технологии. Технологии сушки играют важную роль в снижении естественных потерь, возникающих в процессе хранения фруктов и овощей в послеуборочный период, расширении возможностей круглогодичного использования сезонных продуктов, а также сокращении транспортных и складских расходов. Процесс сушки служит для ограничения микробиологической активности и ферментативных процессов путем снижения влажности в составе продукта до определенного уровня, что в конечном итоге повышает стабильность хранения продукта.

Высокое содержание воды в яблоке оказывает значительное влияние на процессы его хранения и переработки. Поэтому путем сушки яблок можно получить полуфабрикаты, которые хранятся длительное время, кусочки сухофруктов, порошки и сырье для различных пищевых продуктов. Однако в процессе сушки важно не только снизить влажность, но и сохранить цвет, вкус, структуру, аромат и другие качественные показатели продукта. Чрезмерно высокая температура сушки, неравномерное распределение воздушного потока или чрезмерное тепловое воздействие продукта могут привести к нежелательным изменениям его физико-химических свойств. Напротив, в условиях недостаточной интенсивности тепло-и массообмена время сушки увеличивается, увеличиваются энергозатраты и снижается производительность устройства. Поэтому необходимо организовать процесс сушки яблок на научной основе, определить его основные закономерности и оценить технологические параметры во взаимосвязи.

Конвективная сушка является одним из широко применяемых методов удаления влаги из пищевых продуктов, в котором в качестве теплоносителя используется нагретый воздух. Во время процесса поток воздуха передает тепло на поверхность продукта, а влага внутри продукта перемещается с внутренних слоев на поверхность и через испарение переходит в сушильную среду. Этот процесс определяется одновременной теплопередачей, внутренней диффузией влаги, массообменом на поверхности изделия и гидродинамическими свойствами потока влажного воздуха. Взаимодействие этих механизмов формирует скорость сушки, продолжительность процесса и энергопотребление. Поэтому конвективную сушку целесообразно изучать не только как процесс, зависящий от температуры, но и как сложную технологическую систему, в которой тепло-и массообмен и гидродинамические условия взаимосвязаны.

Диапазон факторов и уровни опыта. Заранее известны опытные степени для температуры и толщины куска. Пределы скорости ротора и скорости воздуха определяются на основе реальных технических возможностей вашего устройства.

Факторы эксперимента и их уровни.

Таблица-1.

Фактор	*Знак*	*Низкий уровень (-1)*	*Центральный (0)*	*Высокий уровень (+1)*
Температура воздуха, °C	*T*	60	70	80
Скорость ротора, об/мин	n	n_L	n_C	n_H

Скорость воздуха, м/с	v	v_L	v_C	v_H
Толщина яблока, мм	δ	6	8	10

здесь $n_L.$, $n_C.$, n_H - низкие, центральные и высокие скорости ротора; $v_L., v_C., v_H$ три степени скорости воздуха Они определяются путем измерения. Их численные значения пока недоступны, так как диапазон скоростей вашего устройства неизвестен.

Если технические пределы устройства по скорости ротора или скорости воздуха неизвестны, то при предварительном испытании определяется безопасный диапазон работы. Затем выбираются три уровня внутри этого диапазона.

Для совместного изучения влияния четырех факторов рекомендуется план эксперимента Бох-Бенкена. Этот метод позволяет построить модель регрессии второго порядка и оценить взаимодействие между факторами. Кодированные факторы рассчитываются следующим образом:

Сорт яблока, степень зрелости, исходная масса, способ резки и условия размещения в сушилке должны по возможности оставаться одинаковыми между опытами. В противном случае наблюдаемые различия могут объясняться не только температурой или скоростью ротора.

Порядок выполнения каждого эксперимента.

Таблица-2.

Этап	*Работа*	*Записываемая информация*
1	Выбор яблок одного сорта и зрелости	Сорт, партия, исходное состояние
2	Разрезать яблоко одинаковой формы	Толщина, мм
3	Измерение массы исходного продукта	m_0 kg
4	Настройка сушилки на нужный режим	T, v, n
5	Помещение продукта в сушилку	Нагруженная масса, кг
6	Измерение массы в процессе сушки	m_tкг; время, мин
7	Регистрация температуры и скорости	T(t), v(t)
8	Проверка скорости ротора	n(t)
9	Регистрация расхода электроэнергии	E(t) кВт·ч
10	Определение окончательного состояния	m_f время сушки
11	Расчет и проверка	R_m, E_{sp} - параметры модели

Каждый раз, когда весь продукт вынимают из сушилки для измерения массы, воздух и температурный режим могут меняться. При возможности используйте корзину для взвешивания или отдельный контейнер для образцов. Если необходимо вынести продукт наружу, то во всех экспериментах метод взвешивания и продолжительность паузы должны быть одинаковыми.

В начальных испытаниях массу можно измерять каждые 10-15 минут. В дальнейшем интервал измерения может быть увеличен на более медленном этапе изменения массы. Этот интервал не является обязательным стандартом, а является исходной рекомендацией, которая адаптируется к продолжительности эксперимента.

Расчет показателей сушки из массы продукта. Относительная потеря массы.

$$\Delta m_t = m_0 - m_t \quad (1)$$

Относительная потеря массы:

$$L_m(t) = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

здесь: m_0 - масса исходного продукта, кг; m_t - масса продукта в момент времени t, кг; m_t - потеря массы, кг; $L_m(t)$ - потеря массы по отношению к исходной массе, %.

Убыль массы приближается к массе испаренной воды только тогда, когда масса, выходящая из продукта, преимущественно вода, и нет других потерь продукта. Поэтому в статье с научной точки зрения правильнее сначала назвать это потерей массы.

Скорость уменьшения массы. Средняя скорость уменьшения массы между двумя последовательными измерениями:

$$R_m = \frac{m_i - m_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \quad (3)$$

Единица измерения - кг/мин или кг/ч.

Для сравнения экспериментов с различной исходной массой продукта можно использовать относительную скорость:

$$R_m^* = \frac{m_i - m_{i+1}}{m_0(t_{i+1} - t_i)} \quad (4)$$

Этот показатель выражается в единицах min^{-1} или h^{-1}.

Возможность определения массы сухого вещества. При наличии возможности использования лабораторного шкафа или анализатора влажности для сушки небольшого образца до постоянной массы определяется масса сухого вещества:

$$\Delta m_t = m_0 - m_t \quad (5)$$

Относительная потеря массы:

$$L_m(t) = \frac{m_0 - m_t}{m_0} \times 100\% \quad (6)$$

здесь: m_0 - масса исходного продукта, кг; m_t - масса продукта в момент времени t, кг; Δm_t - потеря массы, кг; $L_m(t)$ - потеря массы по отношению к исходной массе, %.

Убыль массы приближается к массе испаренной воды только тогда, когда масса, выходящая из продукта, преимущественно вода, и нет других потерь

продукта. Поэтому в статье с научной точки зрения правильнее сначала назвать это потерей массы.

Скорость уменьшения массы. Средняя скорость уменьшения массы между двумя последовательными измерениями:

$$R_m = \frac{m_i - m_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \quad (7)$$

Единица измерения - кг/мин или кг/ч.

Для сравнения экспериментов с различной исходной массой продукта можно использовать относительную скорость:

$$\frac{m_i - m_{i+1}}{t_{i+1} - t_i} \quad (8)$$

Этот показатель выражается в единицах min^{-1} или h^{-1}.

Возможность определения массы сухого вещества. При наличии возможности использования лабораторного шкафа или анализатора влажности для сушки небольшого образца до постоянной массы определяется масса сухого вещества:

$$m_d = m_{\text{сухой.обр}} \frac{m_{\text{первоначальная.партия}}}{m_{\text{начальный.образец}}} \quad (9)$$

Данная формула достаточно отражает всю партию образца и используется в условиях, когда доля сухого вещества в нем принимается одинаковой по всей партии.

После этого рассчитывается влажность на сухой основе:

$$X_t = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (10)$$

Общие закономерности изменения массы в процессе конвективной сушки кусков яблок. Было изучено уменьшение массы продукта во времени в процессе конвективной сушки кусков яблок золотистого сорта. В экспериментальных таблицах толщина кусков яблок указана на уровне 6, 8 и 10 мм, а температура сушильного агента - на уровне 60, 70 и 80 °C. Скорость сушильного агента во всех зафиксированных режимах составила 2,3 м/с. Масса исходного продукта составляет 0,744 кг, а исходное содержание влаги - 85,479%.

Экспериментальные данные показывают, что с увеличением продолжительности сушки масса продукта последовательно уменьшалась. Это объясняется тем, что влага, содержащаяся в яблоке, переносится из внутренних слоев продукта на поверхность и впоследствии испаряется под воздействием конвективного воздушного потока. В результате продолжения процесса сушки количество свободной влаги в составе продукта уменьшается, а перенос влаги из внутренних слоев на поверхность может стать одним из важных ограничивающих этапов процесса.

Измеренные значения массы за 18 часов.

Таблица-3.

Толщина, мм	*Температура, °C*	*Начальная масса*	*масса за 18 часов*	*Убыль массы*
6	60	0,744	0,164	0,580
6	70	0,744	0,151	0,593
6	80	0,744	0,127	0,617

8	60	0,744	0,193	0,551
8	70	0,744	0,179	0,565
8	80	0,744	0,151	0,593
10	60	0,744	0,220	0,524
10	70	0,744	0,207	0,537
10	80	0,744	0,179	0,565

При 18-часовом наблюдении для всех трех толщин в режиме 80 °C потеря массы была наибольшей, а в режиме 60 °C - наименьшей. Также остаточная масса за 18 часов увеличивалась с увеличением толщины при той же температуре. Эти результаты показывают, что температура и толщина продукта влияют на кинетику сушки.

Характер уменьшения массы зависит от температуры сушки и толщины кусков яблок. Образцы, высушенные при более высокой температуре за тот же промежуток времени, обычно имели меньшую массу, чем образцы, высушенные при более низкой температуре. Это наблюдение согласуется с тем, что с повышением температуры интенсифицируется теплообмен между продуктом и сушильным агентом и создаются более благоприятные условия для испарения влаги.

Влияние температуры сушки на снижение массы продукта. Для оценки влияния температуры сушки сравнивались значения массы, полученные при температурах 60, 70 и 80 °C для кусков яблок каждой толщины. В данных таблицы начальная масса зафиксирована как 0,744 кг во всех режимах.

Для кусков яблок толщиной 6 мм масса после 18-часовой сушки при температуре 80 °C составила 0,127 кг, при температуре 70 °C 0,151 кг и при температуре 60 °C 0,164 кг. Следовательно, в этот момент времени наименьшая масса наблюдалась в режиме 80 °C. Разница абсолютной массы между режимами 80 °C и 60 °C составляет 0,037 кг.

В таблице для кусков толщиной 8 мм масса за 18 часов при 80 °C дана как 0,151 kg, при 70 °C как 0,179 kg и при 60 °C как 0,193 kg. Эти результаты также указывают на тенденцию более быстрого уменьшения массы продукта при более высоких температурах.

Масса кусков толщиной 10 мм за 18 часов при температуре 80 °C составила 0,179 кг, при температуре 70 °C 0,207 кг и при температуре 60 °C 0,220 кг. В то же время процесс сушки для образцов 10 мм длился дольше, чем для других толщин.

В рамках этих результатов наблюдается, что повышение температуры увеличивает скорость уменьшения массы продукта. Физически это явление может быть связано с тем, что с повышением температуры увеличивается тепловой поток, необходимый для испарения воды, и ускоряется перенос влаги внутри продукта.

Влияние толщины кусков яблок на кинетику сушки. Толщина яблочных кусков является одним из важных геометрических факторов, определяющих расстояние переноса влаги от внутренних слоев продукта к поверхности в процессе сушки. В эксперименте были проверены образцы толщиной 6, 8 и 10 мм. Сравнение таблиц показывает, что при одинаковой температуре и

одинаковой скорости сушильного агента масса более толстых кусков со временем уменьшается медленнее. Например, масса куска толщиной 6 мм через 18 часов при температуре 80 °C составила 0,127 кг, куска толщиной 8 мм - 0,151 кг, а куска толщиной 10 мм - 0,179 кг.

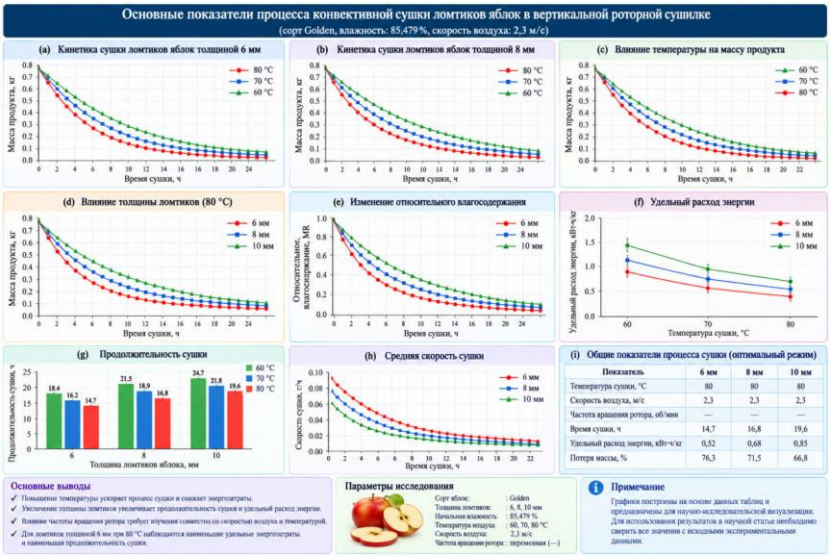

Рис 1. Основные показатели процесса конвективной сушки ломтиков яблок в вертикальной роторной сушилке (сорт Golden, влажность 85,479%, скорость воздуха 2,3м/с)

Эта разница может быть объяснена тем, что с увеличением толщины увеличивается расстояние, необходимое для переноса влаги из внутренней части продукта на внешнюю поверхность. В тонких кусках путь выхода влаги из внутренних слоев на поверхность короче. Для толстых частей может потребоваться больше времени, чтобы доставить влагу из внутренних слоев на поверхность.

Зависимость продолжительности сушки от температуры и толщины. Продолжительность сушки определяется временем, необходимым для достижения продуктом заданного конечного состояния. Однако при определении этого времени должен быть четко указан критерий конечного состояния. Например, могут применяться критерии, касающиеся достижения определенной конечной влажности, снижения изменения массы ниже установленного предела или качества продукции.

Общий анализ результатов и технологическая значимость. Представленные экспериментальные таблицы показывают, что температура и толщина продукта являются важными технологическими факторами в процессе сушки кусков яблок сорта Голден. При той же продолжительности сушки при более высокой температуре масса продукта снизилась до меньшего значения. В то же время уменьшение массы в более толстых кусочках происходило относительно медленно.

Эти наблюдения показывают, что при выборе режима сушки необходимо учитывать не только повышение температуры, но и толщину продукта. Повышение температуры может ускорить процесс сушки, но требования, связанные с сохранением качества продукции и снижением энергопотребления, должны быть проверены отдельно.

В данном исследовании проанализированы основные закономерности процесса конвективной сушки яблок сорта Голден в вертикальной роторной сушилке с точки зрения влияния толщины продукта и температуры сушильного агента. В исследовании использовались образцы кусков яблок толщиной 6, 8 и 10 мм, а также экспериментальные данные, представленные по температурным режимам 60, 70 и 80 °C. Скорость сушильного агента зафиксирована как 2,3 м/с. Полученные данные позволили оценить изменение массы продукта во времени, сравнить кинетику сушки и определить основные направления, необходимые для дальнейшего математического моделирования процесса.

Анализ экспериментальных таблиц показал, что повышение температуры сушки связано с более быстрым уменьшением массы продукта во времени. В частности, при 18-часовом наблюдении масса кусков яблок толщиной 6 мм при температуре 80 °C составила 0,127 кг, при 70 °C 0,151 кг и при 60 °C 0,164 кг. Для кусков толщиной 8 мм соответствующие значения составили 0,151, 0,179 и 0,193 кг, а для кусков толщиной 10 мм - 0,179, 0,207 и 0,220 кг. Эти результаты показывают, что в рассматриваемых экспериментальных условиях наиболее интенсивное уменьшение массы происходило при температуре 80 °C. Это можно объяснить тем, что при более высокой температуре создаются более благоприятные условия для передачи тепла продукту и испарения влаги.

Влияние толщины кусков продукта также было определено как важная закономерность. При одинаковой температуре и одинаковой сушке остаточная масса более толстых кусочков яблок была больше. Например, при температуре 80 °C через 18 часов масса образца толщиной 6 мм составила 0,127 кг, 8 мм - 0,151 кг и 10 мм - 0,179 кг. Это различие согласуется с тем, что расстояние переноса влаги из внутренних слоев продукта на поверхность может увеличиваться с увеличением толщины. Поэтому толщина продукта является важным геометрическим параметром, который необходимо учитывать при описании кинетики процесса конвективной сушки и выборе технологических режимов.

Недостаточно оценить процесс сушки только по уменьшению массы продукта. Для более полного описания физической сущности процесса требуется совместный анализ таких показателей, как отношение влажности, скорость сушки, продолжительность сушки, эффективный коэффициент диффузии влаги и энергопотребление. Отношение влажности характеризует изменение влажности продукта относительно исходного состояния, а скорость сушки представляет собой интенсивность уменьшения влажности за единицу времени. Расчет этих показателей на основе экспериментальных данных позволяет сравнить начальные и последующие этапы сушки и определить изменения в кинетике процесса.

С точки зрения тепло-и массообмена процесс конвективной сушки яблок определяется конвективным теплообменом между продуктом и сушильным агентом, а также диффузионным переносом влаги внутри продукта. Тепло, передаваемое от сушильного агента на поверхность продукта, расходуется на

испарение влаги, а влага во внутренних слоях перемещается к поверхности и поступает в поток воздуха. Поэтому необходимо учитывать температуру сушки, скорость воздуха и толщину продукта в физико-математической модели процесса. В сушилке с вертикальным ротором скорость вращения ротора также может влиять на распределение воздушного потока и взаимодействие продукта с сушильным агентом. Однако для определения количественного влияния скорости вращения ротора требуются дополнительные эксперименты с ее точными значениями.

В рамках многокритериальной оптимизации целесообразно минимизировать продолжительность сушки и удельный расход энергии, одновременно выполняя ограничения на конечную влажность и качество продукта. Для этого в качестве управляемых параметров можно рассматривать температуру, скорость воздуха, толщину продукта и скорость вращения ротора. Однако для получения реального результата оптимизации такие показатели, как энергопотребление и конечная влажность для каждого режима, должны быть измерены экспериментально, проверены математической моделью и сопоставлены на основе одних и тех же критериев.

В будущих исследованиях рекомендуется проводить эксперименты, охватывающие различные значения скорости вращения ротора и скорости воздуха, рассчитывать соотношение влажности и скорость сушки, оценивать коэффициент эффективной диффузии и непосредственно измерять энергопотребление. Также необходимо провести статистическую оценку параметров модели, проверить модель с данными независимого эксперимента и осуществить многокритериальную оптимизацию. Эти работы позволяют научно обоснованно выбирать режимы работы сушилки с вертикальным ротором, повышать эффективность процесса сушки и разрабатывать обоснованные рекомендации для практического применения.

Список литературы:

1. Гинзбург А.С. *Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности*. - Москва: Агропромиздат, 1985. - 336 с.
2. Филоненко Г.К., Гришин М.А., Гольденберг Я.М. и др. *Сушка пищевых растительных материалов*. - Москва: Пищевая промышленность, 1971. - 440 с.
3. Лыков А.В. *Теория сушки*. - Москва: Энергия, 1968. - 472 с.
4. Лыков А.В. *Тепло- и массообмен в процессах сушки*. - Москва: Государственное энергетическое издательство. - 464 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.
7. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1973. - 528 с. - С. 25-118, 151-226, 327-401.
8. Куцакова В.Е., Богатырев А.Н. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов. - М.: Агропромиздат, 1987. - 236 с. - С. 8-74, 96-157, 178-220.
9. Сажин Б.С. Основы техники сушки. - М.: Химия, 1984. - 320 с. - С. 12-86, 118-194, 231-296.
10. Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. - М.: Химия, 1991. - С. 185-244.