

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ЯБЛОК С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ МИКРОВОЛНОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Астрелина П.С. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Бараненко Д.А.
(Университет ИТМО)

Работа выполнена в рамках темы НИР № 622277 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов молекулярного переноса импульса, тепловой энергии и массы в биологических многокомпонентных средах»

Введение. Сохранение должного качества продуктов при длительном хранении – одна из важных задач любого пищевого производства. Замораживание является широко применяемым и эффективным методом длительного хранения продуктов за счет снижения скорости химических реакций и микробной активности. Однако известно, что низкотемпературное воздействие может оказывать нежелательные эффекты, в первую очередь, на клеточную структуру растительного пищевого сырья. Медленное образование кристаллов льда в клетках при замораживании приводит к повреждению микроструктуры продуктов, изменению цвета, вкуса, питательности после размораживания, размягчению тканей, и снижению влагоудерживающей способности.

В качестве возможного решения данной проблемы активно исследуются и разрабатываются инновационные методы замораживания с дополнительным физическим воздействием, среди которых особый интерес представляют переменные электромагнитные факторы, в частности микроволновое излучение [1]. Основным объектом его воздействия являются молекулы воды. Содержание этого компонента во фруктах и овощах может достигать 90%. Дипольные молекулы вращаются при применении к ним микроволнового излучения, что может быть использовано для изменения процессов образования кристаллов льда и их последующего роста [2].

При этом ряд авторов отмечает, что вместе с положительным эффектом переменные электромагнитные факторы могут оказывать нежелательное температурное влияние при замораживании за счет более интенсивного теплообмена [3,4]. Очевидно, что параметры обработки имеют определенные пороговые значения, при пересечении которых возможно нагревание, которое значительно снижает положительный эффект обработки.

Целью данной работы было планирование и проведение многофакторного эксперимента, а также оптимизация параметров микроволнового воздействия для замораживания яблок.

Основная часть.

Планирование матрицы экспериментов осуществлялось в соответствии с принципами DoE (“Design of Experiments”) – систематического подхода к моделированию большинства процессов, который позволяет изучить влияние нескольких факторов одновременно на параметр отклика, в результате проведения серии экспериментов. Аналогичные исследования по оптимизации параметров разного рода физических воздействий однозначно свидетельствуют о значительном влиянии мощности, режима воздействия и общего времени обработки [5,6] на любой процесс, в том числе замораживание. Эти параметры были использованы для проведения эксперимента по оптимизации. Для каждого фактора было определено три уровня: общее время микроволновой обработки 2; 2,5; 3 минуты; режим воздействия x секунд включено / 5 секунд выключено, где x был равен 20, 30 и 40 секундам и мощность воздействия 100, 300 и 500 Вт. В качестве отклика было выбрано время кристаллизации (при быстрой кристаллизации образуются мелкие кристаллы и деструктивное

воздействие на клетки и ткани снижается). Таким образом, целью оптимизации являлась минимизация отклика.

Для проведения исследований были выбраны яблоки российского производства. Предварительно нарезанные образцы в вакуумном пакете погружали в смесь льда и кальция хлористого 6-водного ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) для снижения температурного эффекта микроволнового излучения (температура смеси составляла -30°C), после чего незамедлительно помещали в микроволновую печь. Мощность микроволнового излучения, режим и общее время обработки соответствовали плану эксперимента, составленному ранее. Частота излучения была постоянной в каждом эксперименте и составляла 2450 МГц. Затем образцы помещали в морозильную камеру (-30°C) и фиксировали изменение их температуры.

Оптимизация параметров осуществлялась методом RSM (Response surface methodology) – математический и статистический метод, задачей которого является выявление взаимосвязей между входными факторами и откликом на основе данных многофакторного эксперимента. Планирование, статистическая обработка данных и оптимизация были выполнены при помощи программного пакета Minitab 21.1.1 (Minitab, Inc., США).

В результате работы было получено полиномиальное уравнение второй степени, описывающее исследуемый процесс. Коэффициент детерминации подобранной модели (R^2) составил 0,84. Это показывает, что уравнением регрессии объясняется 84% дисперсии результативного признака. Фактическое значение F-критерия Фишера составило 19,25, что больше критического значения (3,59), следовательно, полученное уравнение регрессии статистически значимо.

Согласно данным оптимизации, минимальное время кристаллизации достигается при следующих параметрах: мощность излучения 100 Вт, режим воздействия 40 с / 5 с, общее время обработки около 2,5 минут. Расчетное время кристаллизации при таких параметрах приближено к 2 минутам.

Выводы. Расчетные данные подтверждают, что полученная модель валидна и результаты оптимизации могут быть использованы в работе. Для образцов, замороженных при оптимальных параметрах, будут проведены дополнительные исследования качественных характеристик после размораживания.

Список использованных источников:

1. Jha P.K. et al. Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes // *Food Chem.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 309.
2. Mujumdar Arun, Woo Meng. Effects of Electric and Magnetic Field on Freezing // *Drying technologies for biotechnology and pharmaceutical applications* / ed. Ohtake Satoshi, Izutsu Ken-ichi, Lechuga-Ballesteros David. Wiley-VCH, 2020. P. 283–301.
3. Tang J., Shao S., Tian C. Effects of the magnetic field on the freezing process of blueberry // *International Journal of Refrigeration.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 113. P. 288–295.
4. Tang J. et al. Effects of different magnetic fields on the freezing parameters of cherry // *J Food Eng.* Elsevier Ltd, 2020. Vol. 278.
5. Ying Y. et al. Optimization of ultrasonic-assisted freezing of *Penaeus chinensis* by response surface methodology // *Food Quality and Safety.* Oxford University Press, 2021. Vol. 5.
6. Khajeh M. Optimization of microwave-assisted extraction procedure for zinc and copper determination in food samples by Box-Behnken design // *Journal of Food Composition and Analysis.* 2009. Vol. 22, № 4. P. 343–346.