

## ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ОБЛЕПИХИ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТИ ОТКЛИКА (ПЛАН БОКСА–БЕНКЕНА)

Иванов М. С.<sup>1</sup>

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент Яковченко Н. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО

msivanov@mail.ru

### Введение

Облепиха (*Hipporhae rhamnoides* L.) рассматривается как перспективное сырьё для получения экстрактов с высоким содержанием фенольных соединений и выраженной антиоксидантной активностью [1]. На выход целевых компонентов и интегральные показатели качества экстракта существенно влияют режимы экстракции и соотношение твёрдой и жидкой фаз [2]. Для сокращения числа опытов при одновременном учёте нелинейности и взаимодействий факторов целесообразно применять метод поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) и план Бокса-Бенкена [3, 4]. Целью работы является оптимизация параметров экстракции на основе экспериментальных данных и построение регрессионных моделей для трёх откликов: IC50 (показатель антиоксидантной активности), DM (массовая доля сухих веществ, %), TPC (общее содержание фенольных соединений, мг GAE на 1 г навески).

### Основная часть

Работа заключается в применении метода поверхности отклика (RSM) и плана Бокса-Бенкена для рационального подбора параметров ультразвуковой экстракции из сырья облепихи при минимальном числе опытов и возможности учёта нелинейности и взаимодействий факторов. Эксперимент проведён по трёхфакторному плану Бокса-Бенкена (15 опытов, включая 3 центральные точки). Варьировали температуру экстракции X1 (50/70/90 °C), длительность ультразвуковой обработки X2 (0/2,5/5 мин) и гидромодуль X3 (1:Y = 10/15/30); расчёты выполняли в кодированном виде (-1, 0, +1).

Оценку эффективности и качества экстрактов выполняли по трём откликам: IC50 (антиоксидантная активность), DM (массовая доля сухих веществ, %) и TPS (суммарные фенольные вещества, мг GAE на 1 г навески).

На основе экспериментальных данных построены квадратичные регрессионные зависимости, позволяющие прогнозировать значения откликов в пределах исследованной области факторов и выбирать компромиссный режим (максимизация TPC при одновременной минимизации IC50 при контроле DM). По смыслу эффектов установлено, что повышение температуры является ключевым фактором, способствующим снижению IC50 и росту TPC; увеличение гидромодуля в исследованном диапазоне дополнительно повышает TPS, но приводит к снижению DM за счёт разбавления. Влияние времени ультразвуковой обработки выражено слабее и проявляется преимущественно в изменении IC50 и DM.

Рекомендуемая область оптимальных условий по совокупности критериев соответствует повышенным значениям температуры при умеренных значениях гидромодуля и ограниченной длительности ультразвукового воздействия, что

обеспечивает баланс между антиоксидантной активностью и выходом фенольных соединений.

Предложенный подход обеспечивает экономичное планирование эксперимента и получение инструментов для выбора оптимального режима экстракции без перебора всех сочетаний факторов, что важно для последующей масштабируемости и внедрения в лабораторную и пилотную практику.

### Выводы

Показано, что применение плана Бокса–Бенкена и RSM позволяет описать влияние температуры, времени ультразвуковой обработки и гидромодуля на показатели качества экстрактов облепихи при ограниченном числе опытов. Наиболее выраженное влияние на IC50 и TPC оказывает температура, тогда как гидромодуль существенно определяет DM. Построенные регрессионные зависимости характеризуются высокими значениями коэффициентов детерминации ( $R^2 = 0,984-0,992$ ;  $R^2_{adj} = 0,955-0,977$ ), что подтверждает их пригодность для прогнозирования в пределах исследованной области факторов. Практический вывод заключается в целесообразности ведения процесса в области повышенной температуры и умеренного гидромодуля при ограниченном времени УЗ-обработки для одновременного увеличения TPC и снижения IC50. Дальнейшая работа будет направлена на экспериментальную валидацию выбранной области оптимума и уточнение рекомендаций для масштабирования процесса.

### Литература

1. Singh B., Oberoi S., Kaur A. Phenolic compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) and their health-promoting activities: a review // International Journal of Food Science and Technology. — 2024. — Vol. 59. — Phenolic compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) and their health-promoting activities. — No. 9. — P. 6642-6658.
2. Wu D., Yang Z., Li J., Huang H., Xia Q., Ye X., Liu D. Optimizing the Solvent Selection of the Ultrasound-Assisted Extraction of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Pomace: Phenolic Profiles and Antioxidant Activity // Foods. — 2024. — Vol. 13. — Optimizing the Solvent Selection of the Ultrasound-Assisted Extraction of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Pomace. — No. 3. — P. 482.
3. Vallejo-Domínguez D., Rubio-Rosas E., Aguila-Almanza E., Hernández-Cocoletzi H., Ramos-Cassellis M.E., Luna-Guevara M.L., Rambabu K., Manickam S., Siti Halimatul Munawaroh H., Loke Show P. Ultrasound in the deproteinization process for chitin and chitosan production // Ultrasonics Sonochemistry. — 2021. — Vol. 72. — P. 105417.
4. Петров С.М., Филатов С.Л., Михайличенко М.С., Подгорнова Н.М. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЕКТИНА ИЗ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И МИКРОВОЛНОВОЙ ЭКСТРАКЦИИ // Актуальная биотехнология. — 2024. — № 1. — С. 13-17.