

Панина Анастасия Сергеевна, Аспирант,
ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г. В. Плеханова»

АНТИОКСИДАНТНАЯ АКТИВНОСТЬ ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ ФИТОКОМПОНЕНТОВ *CURCUMA LONGA* L. В ПОЛИСАХАРИДНЫХ ПЛЁНКАХ

Аннотация. Исследована антиоксидантная активность полисахаридных плёнок с инкапсулированным экстрактом куркумы. Альгинатные плёнки с 1,0% экстракта показали максимальное ингибирование ДФПГ-радикала (56,4%), коррелирующее с содержанием куркуминоидов ($r=0,97$). Установлена высокая стабильность при хранении (сохранность 88% за 90 суток), что обосновывает их применение для направленной доставки антиоксидантов.

Ключевые слова: Куркуминоиды, антиоксидантная активность, ДФПГ-тест, полисахаридные плёнки, альгинат натрия, инкапсулирование.

Введение

Куркума длинная (*Curcuma longa* L.) является одним из наиболее изученных источников природных полифенолов, обладающих широким спектром биологической активности. Основные действующие вещества – куркуминоиды (куркумин, деметоксикуркумин и бисдеметоксикуркумин) – проявляют выраженные антиоксидантные, противовоспалительные и антимикробные свойства [1]. Однако их практическое применение в пищевых и фармацевтических системах ограничено низкой растворимостью в воде, высокой скоростью метаболизма и нестабильностью при воздействии света, кислорода и температуры [2, 3].

Одним из перспективных подходов к преодолению данных ограничений является инкапсулирование куркуминоидов в полимерные матрицы, обеспечивающие их защиту и контролируемое высвобождение [4]. Среди множества носителей особый интерес представляют полисахаридные плёнки, которые биоразлагаемы, биосовместимы и могут быть получены простыми методами [5].

Материалы и методы

В рамках исследования корневища куркумы длинной (*Curcuma longa* L.) культивировали в аэропонной системе в регулируемом фитотроне при спектральном режиме с преобладанием красного света. Сбор урожая проводили на 120-е сутки. Высушенное сырьё измельчали до порошка (размер частиц $\leq 0,5$ мм). Экстракцию выполняли комбинированным методом: навеску 1 г сырья обрабатывали 20 мл 70% этанола в ультразвуковой ванне при 30–35 °С в течение 20 мин, затем термостатировали при 50 °С в течение 30 мин, фильтровали и центрифугировали. Содержание куркуминоидов определяли методом ВЭЖХ.

Далее готовили плёнообразующие растворы из хитозана, НКМЦ, альгината натрия и пектина (2% масс./об.) с добавлением пластификатора (глицерин 1%) и экстракта куркумы (0,5; 1,0 и 2,0% от массы полисахарида). Растворы разливали на стеклянные подложки (толщина влажного слоя 0,8–1,0 мм), сушили при 40 °С в течение 24 ч и кондиционировали при 55% относительной влажности и 25 °С в течение 48 ч. Контрольные образцы готовили без экстракта.

Антиоксидантную активность (АОА) определяли спектрофотометрическим методом с использованием стабильного радикала 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ). Навеску плёнки 50 мг измельчали и экстрагировали в 5 мл 96% этанола в течение 24 ч. Аликвоту экстракта (0,1 мл) смешивали с 2,4 мл $8,1 \times 10^{-5}$ М раствора ДФПГ в этаноле, доводили объём до 3,2 мл и инкубировали при 293 К в течение 30 мин. Оптическую плотность измеряли при 517 нм. Результаты выражали в процентах ингибирования ДФПГ и в мг эквивалента галловой кислоты на грамм плёнки (мг ГК/г). Дополнительно проводили кулонометрическое



титрование электрогенерированным бромом. Стабильность АОА оценивали в течение 90 суток хранения в герметичных контейнерах при 25 °С в темноте. Все эксперименты выполнены в трёх повторностях.

Результаты и обсуждение

Комбинированная экстракция обеспечила максимальное извлечение куркуминоидов из аэропонных корневищ – $6,96 \pm 0,41$ мг/г сухого сырья (для почвенных образцов – $8,26 \pm 0,48$ мг/г). Соотношение индивидуальных куркуминоидов (куркумин: деметоксикуркумин: бисдеметоксикуркумин $\approx 6,2: 3,3: 1,0$) соответствовало литературным данным [1].

Контрольные плёнки (без экстракта) проявляли незначительную собственную АОА (ингибирование ДФПГ 4,2–8,2%), что обусловлено наличием свободных гидроксильных групп в полисахаридах. Введение экстракта куркумы закономерно повышало АОА для всех типов плёнок (таблица 1). Наивысшие показатели зафиксированы для альгинатных плёнок с 1,0% экстракта (ингибирование 56,4%, 0,88 мг ГК/г). Хитозановые плёнки показали близкие результаты (52,8%, 0,82 мг ГК/г), тогда как пектиновые плёнки уступали (38,6%, 0,59 мг ГК/г). Повышение концентрации экстракта до 2,0% приводило к снижению АОА на 7–10% относительно максимума, что связано с агрегацией куркуминоидов и ограничением доступности фенольных гидроксильных групп для взаимодействия с ДФПГ-радикалом [3].

Таблица 1

Антиоксидантная активность полисахаридных плёнок с экстрактом куркумы (ДФПГ-тест)

Образец	Ингибирование ДФПГ, %	АОА, мг ГК/г плёнки
Хитозан (1,0%)	$52,8 \pm 3,8$	$0,82 \pm 0,06$
НКМЦ (1,0%)	$44,5 \pm 3,2$	$0,68 \pm 0,05$
Альгинат (1,0%)	$56,4 \pm 4,0$	$0,88 \pm 0,06$
Пектин (1,0%)	$38,6 \pm 2,8$	$0,59 \pm 0,04$

Источник: составлено автором на основе экспериментальных данных.

Корреляционный анализ выявил сильную прямую связь между антиоксидантной активностью и содержанием куркуминоидов в плёнках ($r=0,97$; $p<0,01$), что подтверждает определяющую роль куркуминоидов в радикал-нейтрализующей способности [1]. Кулонометрическое титрование дало систематически более высокие значения (на 5–6%) по сравнению с ДФПГ-тестом, что объясняется различной химической основой методов: кулонометрия оценивает суммарную восстановительную ёмкость, включая вклад не только фенольных соединений, но и других электронодонорных компонентов. Однако высокая корреляция между методами ($r=0,96$; $p<0,01$) подтверждает согласованность результатов.

Мониторинг АОА в течение 90 суток хранения показал, что альгинатные плёнки с 1,0% экстракта сохраняют 88,2% исходной активности, хитозановые – 83,8%, НКМЦ – 81,8%, пектиновые – 80,2%. Содержание куркуминоидов в альгинатных плёнках за этот период снизилось с 8,26 до 7,23 мг/г (сохранность 87,5%), что коррелирует с падением АОА. Полученные результаты согласуются с литературными данными о стабилизирующем эффекте альгинатной матрицы, обусловленном образованием водородных связей между карбоксильными группами полимера и фенольными гидроксильными группами куркуминоидов [5].

Сравнительный анализ показывает, что альгинат натрия является наиболее эффективной матрицей для инкапсулирования куркуминоидов, обеспечивая высокую антиоксидантную активность и длительную стабильность, что делает альгинатные плёнки перспективными для создания функциональных пищевых продуктов с направленной доставкой антиоксидантов.



Заключение

Разработаны полисахаридные плёнки с инкапсулированным экстрактом куркумы, полученным из аэропонного сырья. Установлено, что альгинатные плёнки с 1,0% экстракта обладают наивысшей антиоксидантной активностью (ингибирование ДФПГ 56,4%, 0,88 мг ГК/г) и сохраняют её в течение 90 суток хранения на уровне 88%. Выявлена сильная корреляция между антиоксидантной активностью и содержанием куркуминоидов ($r=0,97$), что подтверждает их ключевую роль в радикал-нейтрализующей способности. Разработанные системы могут найти применение в качестве нутрицевтических ингредиентов для обогащения пищевых продуктов и коррекции окислительного стресса.

Список литературы:

1. Kocaadam B., Şanlıer N. Curcumin, an active component of turmeric (*Curcuma longa*), and its effects on health // *Crit Rev Food Sci Nutr.* – 2017. – Vol. 57, No. 13. – P. 2889–2895.
2. Li Y. et al. Curcumin production and bioavailability: A comprehensive review of curcumin extraction, synthesis, biotransformation and delivery systems // *Industrial Crops and Products.* – 2021. – Vol. 172. – P. 114050.
3. Yan Y. et al. Advancing cancer therapy: Nanomaterial-based encapsulation strategies for enhanced delivery and efficacy of curcumin // *Materials Today Bio.* – 2025. – Vol. 33. – P. 101963.
4. Monteiro M.M. et al. Chitosan-Based Systems for Curcumin Delivery: Evidence for Therapeutic Applications // *J Biochem Mol Toxicol.* – 2025. – Vol. 39, No. 10. – P. e70515.
5. Łupina K. et al. Antioxidant polysaccharide/gelatin blend films loaded with curcumin – A comparative study // *International Journal of Biological Macromolecules.* – 2023. – Vol. 235. – P. 123945.

