

УДК 635.075:577.114

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА ДЛЯ ПОСЛЕУБОРОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ТОМАТОВ

© 2024 г. А. В. Ильина¹, Б. Ц. Шагдарова¹, *, А. А. Зубарева¹, В. П. Варламов¹

¹Институт биоинженерии, Федеральный исследовательский центр “Фундаментальные основы биотехнологии” Российской академии наук, Москва, 119071 Россия

*e-mail: shagdarova.bal@gmail.com

Поступила в редакцию 15.09.2023 г.

После доработки 18.10.2023 г.

Принята к печати 07.11.2023 г.

Обзорная статья включает информацию об использовании покрытий как из самого хитозана, так и в сочетании с другими полисахаридами и функциональными соединениями, для послеуборочной обработки, главным образом томатов, с целью продления срока хранения собранной продукции. При сборе урожая фруктов и овощей потери от грибковой инфекции могут достигать 50%. Для предотвращения потерь урожая и сохранения качества плодов применяют различные способы послеуборочной обработки. В настоящее время наиболее эффективными средствами, используемыми для борьбы с послеуборочными болезнями, являются синтетические фунгициды, но их неконтролируемое применение отрицательно воздействует на здоровье человека и окружающую среду. В последнее время сохраняется тенденция к расширению использования природных противомикробных препаратов. Такими природными соединениями могут быть хитин и хитозан. Они возобновляемы, биоразлагаемы, малотоксичны и безопасны для потребителей и окружающей среды. Способность хитозана к пленкообразованию и его антимикробные и антиоксидантные свойства важны для получения функциональных покрытий для послеуборочной обработки плодов.

Ключевые слова: хитозан, хитозановое покрытие, хитозан-нанооксидное покрытие, хитозан-полисахаридное покрытие, хитозан-активное покрытие, антимикробные свойства, послеуборочная обработка, плоды томата

DOI: 10.31857/S0555109924020019 EDN: GBKOOG

По своей природе большинство сезонных плодовоовощных культур имеют короткий срок хранения. Одной из причин этого является сохранение дыхательной активности и транспирации у фруктов и овощей даже после сбора урожая, а другая причина заключается в поражении патогенными микроорганизмами. Потери от грибковой инфекции у фруктов и овощей в послеуборочной цепочке могут достигать от 30 до 50%, в некоторых случаях поражение может привести к полной потере собранного урожая. Качество плодов не может быть улучшено после сбора урожая, а может быть только сохранено [1].

Томаты (*Solanum lycopersicum*) — одна из наиболее экономически важных культур в мире, объем производства которых в 2020 г. составил ~187 млн т, собранных с площади 6.1 млн га [2]. Более 200 видов заболеваний могут привести к значительным потерям во время выращивания и после сбора урожая томатов [3]. Среди фитопатогенных грибов, поражающих посевы томатов, поражение *Botrytis cinerea* является второй по распространенности причиной экономических потерь во всем

мире. Относительно короткий срок хранения томатов ограничивает коммерческую транспортировку на большие расстояния и доступность этой продукции круглый год без дополнительной обработки. До 30% собранного урожая томатов может быть утрачено в послеуборочное время, главным образом, в результате поражения, вызванного фитопатогенами, чаще других *B. cinerea* [3–5] и др. Применяемые в настоящее время синтетические фунгициды наиболее эффективны в борьбе с послеуборочными болезнями. Развитие устойчивости у патогенов к синтетическим фунгицидам и негативное воздействие последних на окружающую среду способствует расширению использования природных противомикробных препаратов [8–12].

Хитин и хитозан — это доступные, возобновляемые природные соединения, которые поддаются биологическому разложению, малотоксичны и поэтому безопасны для потребителей и окружающей среды. Хитин и хитозан являются сополимерами N-ацетил-D-глюкозамина и D-глюкозамина, соотношение мономеров в полимерной цепи определяет физические, химические и биологические

свойства. Звенья N-ацетил-D-глюкозамина и D-глюкозамина в хитине и хитозане связаны друг с другом β -1,4-гликозидными связями. Хитин отличается от хитозана более высокой долей N-ацетил-D-глюкозамина по сравнению с D-глюкозамином в полимерной цепи [13]. В сельском хозяйстве хитозан используется в основном в качестве экологически безопасного биопестицида, повышающего врожденную способность растений противостоять грибковой инфекции, а также в качестве натурального средства для предотвращения болезней семян и усиления роста растений. Биологическая активность хитозана обусловлена его антимикробными, адсорбционными, антиоксидантными и элиситорными свойствами [12, 14, 15]. Хитин — один из наиболее распространенных полисахаридов в природе среди многих сырьевых материалов. Хитозан — дезацетилированное производное хитина. Способность хитозана к пленкообразованию и его антимикробные и антиоксидантные свойства важны для получения функциональных пленок.

Хитозан не растворяется в воде и в большинстве обычных органических растворителей, но хорошо растворяется в кислых водных растворах с pH ниже 6.3. Растворимость хитозана зависит от его физико-химических характеристик, а также распределения ацетильных групп по основной цепи. В зависимости от используемой для растворения кислоты и концентрации хитозана полимер образует вязкие растворы и проявляет пленкообразующие свойства [16]. Растворение хитозана в кислых условиях способствует активированию его противомикробного действия. В работе [16] исследовали способность различных кислот растворять хитозан из панцирей крабов в виде мелкого порошка и оценивали эффективность растворов биополимера в борьбе с послеуборочной серой гнилью *B. cinerea* на примере ягод столового винограда. Растворение хитозана исследовали в различных органических и неорганических кислотах, взятых в концентрации 1%. Кислоты, которые успешно растворяли хитозан в этой концентрации, имели pH от 0.6 (хлористоводородная) до 2.8 (уксусная), в то время как кислоты (галловая, *транс*-коричная, DL- α -аминомасляная), не способные растворять биополимер, имели pH $\geq$ 2.9. Авторы сделали вывод, что физические свойства, такие как вязкость пленкообразующего раствора в диапазоне от 1.9 сП (аскорбат) до 306.4 сП (малеат), а также толщина хитозанового покрытия от 6.5 мкм (ацетат) до 15.4 мкм (аскорбат), не коррелировали с эффективностью его использования. Наиболее эффективной (70%) оказалась обработка раствором ацетата хитозана (вязкость 43.5 сП, толщина покрытия 6.5 мкм) по отношению к патогену, а также при последующем хранении ягод при 15°C в течение 10 дней. Сами растворы кислот с pH 5.6 были не эффективны против патогена.

Антимикробное действие хитозана на патогенные микроорганизмы зависит от штамма, молекулярной массы (ММ), степени дезацетилирования (СД) и других показателей [17]. Высокомолекулярный хитозан может образовывать плотный слой на поверхности микробной клетки, изменяя клеточную проницаемость, таким образом блокируя поступление питательных веществ в клетку. В то время как низкомолекулярный хитозан может проникать в цитозоль и связываться с ДНК клеток, следствием чего является нарушение синтеза мРНК и белка и в результате гибель клетки. Антимикробное действие хитозана заключается во взаимодействии отрицательно заряженных функциональных групп на внешней поверхности мембран микробных клеток с положительно заряженными аминогруппами на хитозане. Это меняет свойства мембраны и может приводить к утечке внутриклеточного содержимого и в конечном итоге к гибели клеток. Электростатическое взаимодействие зависит от состава плазматической мембраны, оно более сильное с мембранами, которые содержат полиненасыщенные жирные кислоты [18]. Кроме того, действие хитозана можно объяснить его хелатирующими свойствами. Хитозан оказывает хелатирующее действие, связывая основные металлы и тем самым подавляя рост микробов. Взаимодействуя с ионами металлов, он ингибирует активный центр метаболических ферментов микробных клеток [19].

Антиоксидантное действие хитозана подразумевает создание барьера для предотвращения образования активных форм кислорода или их доступа к объекту. На сегодняшний день точный механизм удаления свободных радикалов хитозаном не ясен. Возможно, нестационарные свободные радикалы реагируют с функциональными группами в положении С-2, С-3 и С-6 пиранозного кольца с получением стабильных макромолекулярных радикалов [15, 20].

Функциональные покрытия из природного сырья. Количество публикаций, индексируемых в базе данных “Scopus”, связанных с использованием хитозана в качестве материала для покрытия пищевой продукции увеличилось с 30 до 900 в период с 2005 по 2020 г. [21].

В таблице 1 представлены работы, в которых формировали покрытия на основе хитозана в сочетании с другими полисахаридами и функциональными соединениями для послеуборочной обработки продукции с целью продления срока хранения и сохранения качества, главным образом томатов. Покрытия создают барьер для газообмена, снижают дыхание плодов, а также замедляют их созревание.

Покрытия на основе хитозана. Для сохранения собранной продукции ее поверхность может быть покрыта съедобными биоразлагаемыми материалами путем распыления, погружения (рис. 1) или смазывания [32].

Таблица 1. Эффект послеуборочных покрытий из хитозана в сочетании с другими функциональными соединениями на плоды томатов

Томаты, сорт	Характеристики хитозана	Комбинация	Действие	Ссылка
<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill	Вязкость 15 сП, СД 90%	Хитозан 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 и 1.0%	Ингибирование <i>B. cinerea</i> и <i>Penicillium expansum</i> , увеличение активности полифенолоксидазы, пероксидазы и содержания фенольных соединений при использовании покрытий 0.5 и 1.0%	[22]
<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill	ММ 50–190 кДа, вязкость 20–300 сП, СД 75–85%	Хитозан 0.5, 1.0 и 2.0%	Сохранение веса, плотности плодов, содержания ликопина, аскорбиновой кислоты, фенолов и др. 20 сут при 5°C; 10 сут при 21°C при использовании покрытий 0.5 и 1.0%	[23]
<i>Solanum lycopersicum</i> (черри)	—	Хитозан 1% / 0.2, 0.4, 0.6% нано-ZnO, 50 ± 10 нм	Усиление механических, антибактериальных свойств, увеличение зоны ингибирования <i>Salmonella</i> , <i>E. coli</i> , <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> и <i>Staphylococcus aureus</i> при использовании покрытия с 0.6% нано-ZnO	[24]
Зеленые <i>Solanum lycopersicum</i> L.	ММ 100 кДа, СД 85%	Хитозан 1%/нано-TiO ₂ , 21 нм, (вес./вес.)	Усиление механических и барьерных свойств, сохранение качества и увеличение срока хранения томатов	[25]
Зеленые <i>Solanum lycopersicum</i> L. cv. Zheza 205	СД ≥ 95%	Хитозан/ нано SiO _x , 20–50 нм	Замедление потери веса, общего количества растворимых твердых веществ, сохранение титруемых кислот, увеличение срока хранения томатов. Уровень ингибирования композитным раствором против <i>E. coli</i> и <i>S. aureus</i> составлял 43 и 38%	[26]
<i>Solanum lycopersicum</i> L.	СД 83.2%	Хитозан 1.5% / цеолит 3% (вес./вес.)	Потеря веса — 5.6% при использовании покрытия из композита, 8.5% из хитозана. Поражение грибами не наблюдалось 37 сут при 10°C	[27]
—	ММ 160 кДа, СД 94%	15% хитозан бигуанидин гидрохлорид/ КМ-целлюлоза / альгинат	Антибактериальное действие по отношению к <i>S. pneumonia</i> , <i>Bacillus subtilis</i> и <i>E. coli</i> . Значительное снижение потери веса, замедление порчи фруктов	[28]
Черри (<i>Koko</i>)	ММ 190–310 кДа, СД 75–85%	1% хитозан/ экстракт семян грейпфрут (ЭСГ) 0.5–1.2%	Эффективное подавление роста <i>Salmonella</i> и мезофильных аэробов, не влияло на концентрацию ликопина, цвет, органолептические свойства, отсутствие потери веса после 21сут/25°C при использовании 1% хитозан/ ЭСГ 1.0%	[29]
Розовые	СД 85%	Хитозан 0.5–1.5% / ванилин 10 и 15 мМ	Снижение изменений твердости, концентрации растворимых сухих веществ плодов, заболеваемости на 74%, тяжести заболеваемости на 79%, потери веса до 90%. Сохранение содержания аскорбиновой кислоты, антиоксидантных свойств. Продление срока хранения до 25 сут при 26 ± 2°C и относительной влажности 60 ± 5% при использовании покрытия хитозан 1.5% / 15 мМ ванилин	[30]
“Chonto” <i>Solanum lycopersicum</i> L.	ММ 190–310 кДа, СД 85%	2% хитозан /ЭМР 0.5, 1.0 и 1.5% (об./об.)	Полное подавление роста плесени и дрожжей на поверхности томатов, отсутствие влияния на качество плодов (12 сут, 4 ± 0.2°C) при использовании 2% хитозан / ЭМР 1.0 и 1.5%	[5]
Italian <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.	СД 85.9%	16 вариантов: 10 г/л крахмала, маниоки и хитозана (5–30 г/л), эфирное масло (0–10 мл/л) и экстракт кожуры граната (0–20 мл/л)	Наименьшая потеря веса, снижение общего содержания сухих растворимых веществ, сохранение твердости по сравнению с плодами без покрытия при хранении 12 сут при 25°C, при использовании покрытия состоящего из 10 г/л хитозана, 10 г/л крахмала маниоки, 10 мл/л эфирного масла и 20 мл/л экстракта кожуры граната	[31]

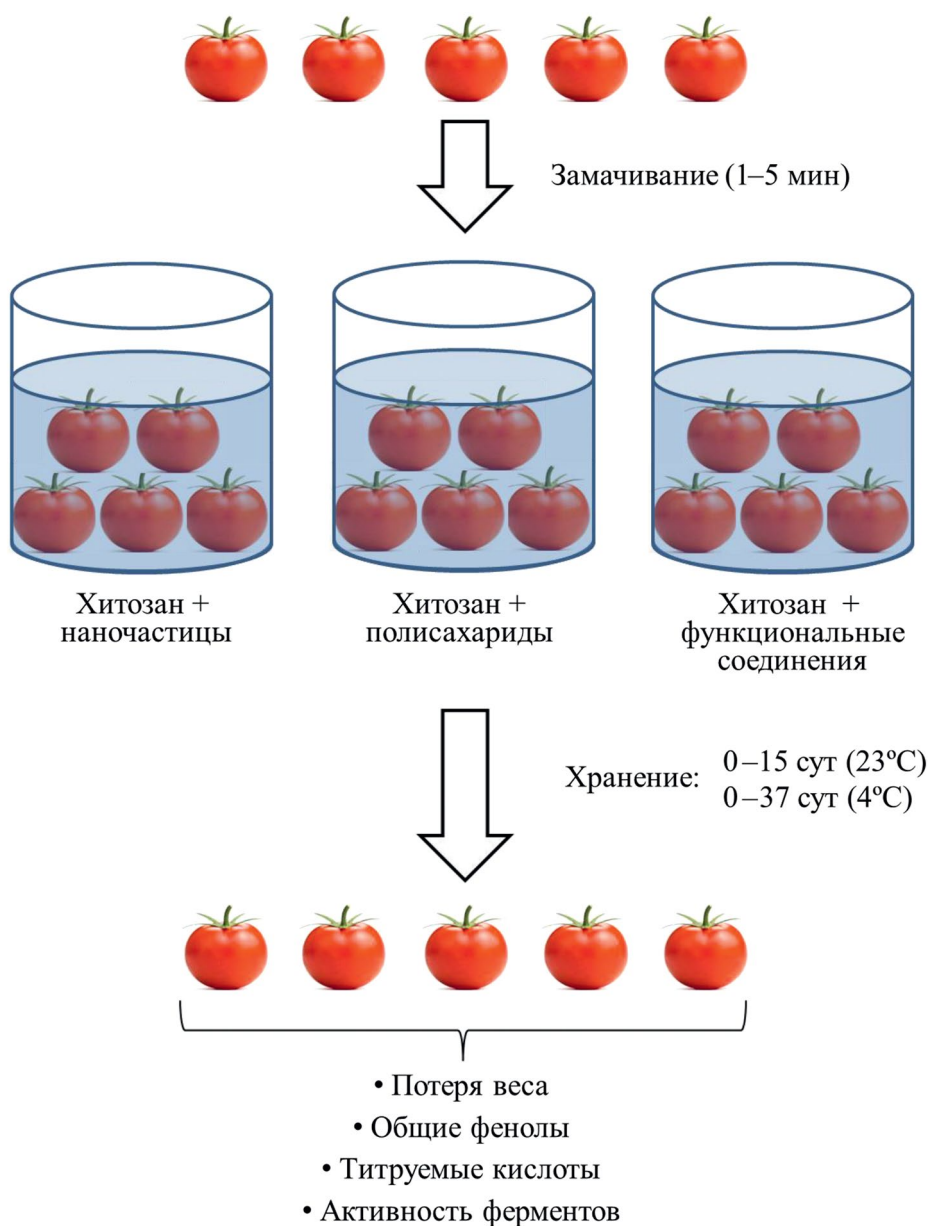


Рис. 1. Влияние покрытий на основе хитозана на сохранность и качество плодов томатов.

В работе [22] было исследовано влияние хитозана на серую и синюю плесени, вызываемые *B.cinerea* и *Penicillium expansum* соответственно на плодах томата (*Lycopersicon esculentum* Mill). Плоды собирали на зрелой стадии (цвет плода красный). Хитозан с СД 90% и вязкостью 15 сП обеспечивал эффективную борьбу с обеими болезнями плодов томатов, хранящихся при 25 и 2°C. В работе использовали 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 и 1.0%-ный солянокислый раствор хитозана (рН 5.4). Хитозан уже значительно ингибировал прорастание спор *P. expansum* и *B. cinerea* при концентрации хитозана 0.5 и 1.0% соответственно, а также удлинение

зародышевых трубок и рост мицелия. Хитозан повреждал плазматические мембраны спор обоих патогенов. Плазматическая мембрана *P. expansum* была более чувствительна к хитозану по сравнению с *B. cinerea*. Мембраны *P. expansum* сохраняли целостность на 48.2%, тогда как *B. cinerea* — на 82.5% после 2 ч инкубации на картофельно-декстрозном бульоне, содержащем 0.5% хитозана. Обработка хитозаном вызывала значительное повышение активности ферментов, таких как полифенолоксидазы, пероксидазы, и повышала содержание фенольных соединений в плодах томата. Полученные результаты свидетельствовали о действии хитозана на

серую и синюю гниль плодов, которое могло быть связано с прямым фунгицидным эффектом против патогенов и с проявлением биохимических защитных реакций у плодов.

В работе [23] сообщалось об эффективности применения покрытия на основе хитозана с ММ 50–190 кДа, вязкостью 20–300 сП, СД 75–85%. С целью продления послеуборочного качества свежих томатов (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. 'Diamantino') использовали растворы хитозана концентрацией 0.5, 1.0 и 2.0% в уксусной кислоте. Плоды обрабатывали методом погружения в хитозан различной концентрации на 5 мин, тогда как контрольные плоды погружали на такое же время в дистиллированную воду, содержащую уксусную кислоту. После обработки плоды сушили в течение 2 ч при комнатной температуре. Плоды хранили при температуре 5 и 21°C при влажности 90 и 65% соответственно. После обработки 1%-ным раствором хитозана потеря веса плодов уменьшалась относительно контроля в 2 раза к концу срока хранения при 5 и 21°C. Хитозановое покрытие (0.5 и 1%) поддерживало послеуборочное содержание ликопина в плодах. Общее содержание ликопина в томатах, хранившихся при 21°C, было заметно выше, чем в томатах, хранившихся при 5°C. Содержание аскорбиновой кислоты в томатах, обработанных 1%-ным раствором хитозана, на 10 суток при 21°C составило 9.27 мг/100 г, в контрольных — 7.59 мг/100 г. Авторы рекомендовали использование 1%-ного раствора хитозана в качестве покрытия. Большинство параметров, таких как вес, плотность плодов, визуальное сохранение качества, задержка изменений в биохимическом составе соединений (содержание ликопина, аскорбиновой кислоты, фенолов и др.), при этой концентрации в тестируемый период не ухудшались.

Опираясь на данные, представленные в работе [33] подсчитали, что эффективность борьбы с послеуборочной гнилью на свежих овощах и фруктах с применением хитозана на 35–45% обусловлена его антимикробными свойствами, на 30–40% элиситорными и на 20–30% пленкообразующими. Покрытие из хитозана создает барьер для газообмена, снижения дыхания и замедления созревания. Свойства покрытия, например его вязкость, толщина, зависят от кислоты, в которой растворяли хитозан. Например, вязкость пленкообразующего раствора хитозана в растворе 1%-ной уксусной, муравьиной, молочной или соляной кислоты составляла 43.5, 234.9, 102.9 или 3.9 сП, а толщина покрытия 6.5, 9.8, 9.7 или 11.2 мкм соответственно [16]. Покрытие из хитозана (из панциря краба), растворенного в любой из кислот, уменьшало послеуборочную серую гниль (*B. cinerea*) на примере столового винограда Crimson Seedless. Авторы считают, что наиболее эффективным покрытием является ацетат хитозана (вязкость 43.5 сП), обработка

которым эффективно уменьшала послеуборочную гниль и не повреждала ягоды винограда. Небольшие грозди винограда хранили при $0.5 \pm 1^\circ\text{C}$ в течение 60 сут.

В работе [34] исследовали влияние хитозанового покрытия на примере плодов гуавы. После сбора урожая плоды имеют короткий срок хранения из-за интенсивных метаболических процессов. В работе для покрытия плодов использовали 1, 2 и 3%-ный раствор хитозана (вязкость 20–300 сП, СД 95–98%). Обработка вызывала значительное снижение активности фенилаланин-аммиак-лиазы и повышение активности пероксидазы. Полученные результаты показали, что покрытие из хитозана эффективно сохраняло качественные характеристики плодов после сбора урожая за счет усиления антиоксидантных процессов, оно задерживало созревание при 25°C в течение 96 ч хранения. Хитозановое покрытие замедляло потерю веса плодов по сравнению с контролем. Увеличение концентрации раствора хитозана с 1.0 до 3.0% давало дополнительное преимущество при контроле потери веса. Этот эффект наблюдался в течение 96 ч после обработки, при этом самые низкие значения наблюдались при обработке 3%-ным раствором хитозана, затем следовали результаты для 2%, 1%-ного покрытия и контрольного образца без покрытия, что свидетельствовало о положительном эффекте хитозанового покрытия в качестве защитного барьера, предотвращающего потерю влаги плодами при транспирации. Авторы полагают, что хитозановое покрытие можно рассматривать для коммерческого применения и увеличения срока годности и сохранения качества плодов при комнатной температуре [34].

Покрытие на основе хитозана с наночастицами неорганических оксидов. Некоторые исследователи считают, что слабая механическая прочность ограничивает применение хитозановых пленок в качестве покрытия. Добавление в хитозановые пленки наночастиц, например оксидов некоторых металлов, улучшает их механические свойства. В работе [24] были разработаны и получены композитные пленки для более длительного хранения плодов томата черри (*Solanum lycopersicum*). Методом погружения плодов в раствор были получены композитные пленки на основе порошка хитозана с введением 0.2, 0.4 и 0.6% нанooksида цинка (нано-ZnO), с размером частиц 50 ± 10 нм и чистотой 99.8%. Добавление нано-ZnO в хитозановые пленки усиливало их механические, антибактериальные и антиоксидантные свойства. Исследовали противомикробное действие полученных пленок против грамотрицательных бактерий *Salmonella* (ATCC13076) и *Escherichia coli* (ATCC25922), а также грамположительных бактерий *Staphylococcus aureus* (ATCC25923) и *Alicyclobacillus acidoterrestris* (DSM 3923). На основе механических, оптических,

водорастворимых и антибактериальных свойств композитных пленок была выбрана пленка с содержанием 0.6% нано-ZnO. Добавление наночастиц оксида цинка значительно увеличило зоны ингибирования *Salmonella*, *E. coli*, *A. acidoterrestris* и *S. aureus* до 23.30 ± 1.06 , 16.36 ± 1.26 , 52.25 ± 3.35 и 11.62 ± 0.54 мм соответственно. Антибактериальный эффект композитной пленки был значительно выше в отношении *A. acidoterrestris*, чем против *Salmonella* и *E. coli*. Результаты показали, что композитная пленка, нанесенная на поверхность томатов черри, ограничивала газообмен, замедляла интенсивность дыхания, поддерживала содержание растворимых твердых веществ, цвет и подавляла рост микроорганизмов на поверхности плодов. Каждую группу плодов хранили при температуре $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и относительной влажности 70–75% в течение 15 сут. Физико-химические свойства томатов черри оценивали при хранении каждые три дня. Авторы считают, что композитная пленка хитозан-нано-ZnO представляет собой материал, который можно применять для решения проблем хранения, связанных с томатами черри [24].

В работе [25] исследовали возможность использования активной упаковки из хитозана (ММ 100 кДа, СД 85%) и хитозана, содержащего наноразмерный диоксид титана (21 нм, чистота 99.5%), для плодов томата (*Solanum lycopersicum* L.). Диоксид титана (TiO_2) проявлял противомикробные свойства, кроме того это широко используемый химически инертный материал [35]. Нанокompозитная пленка хитозан/ TiO_2 и пленка из хитозана были изготовлены методом литья из раствора с последующим выдерживанием при 25°C , влажности 50% в течение 48 ч. Полученные пленки использовали в качестве активной упаковки для замедления процесса созревания томатов черри (*Solanum Lycopersicum* L.). У плодов ряда растений, и в том числе томатов, наблюдается резкий подъем дыхания в конце их созревания, контролируемый этиленом. Пленка из хитозана с наночастицами TiO_2 (1%, вес/вес) имела хорошие механические и барьерные свойства и обладала способностью к фоторазложению этилена. Были определены изменения плотности плодов, потеря веса, цвета, содержание ликопина, общего растворимого сухого вещества, аскорбиновой кислоты и концентрации этилена и углекислого газа в томатах, упакованных в пленку хитозан/ TiO_2 и пленку только из хитозана, во время хранения при 20°C . Авторы полагают, что разработанная нанокompозитная пленка хитозан/ TiO_2 может быть использована для коммерческого применения при послеуборочной обработке свежих продуктов.

В работе [26] была изучена эффективность композитной пленки на основе хитозана (СД $\geq 95\%$) и нанокремния (нано- SiO_x) со средним размером частиц 20–50 нм. Оксид кремния (SiO_x) благодаря

своей полигидроксильной структуре легко связывается с поверхностью хитозана, тем самым повышая механические свойства хитозанового покрытия. Для приготовления пленкообразующего раствора использовали 1%-ный раствор хитозана в 0.1%-ной уксусной кислоте. Весовое соотношение хитозана к частицам нано- SiO_x составляло 20 : 1. Для лучшего растворения обоих компонентов использовали ультразвуковую обработку. Композитные пленки были использованы для проверки их профилактического действия на томатах в условиях хранения в течение 15 сут при влажности 85%, $23 \pm 1^\circ\text{C}$. Исследования проводили на томатах (*Solanum lycopersicum* L. cv. Zheza 205) зеленой спелости, чтобы уменьшить послеуборочные потери. Плоды обрабатывали пленкообразующими растворами методом погружения. Антибактериальную активность пленкообразующих растворов анализировали относительно типичных патогенных микробов пищевого происхождения, *E. coli*, CICC23657 и *S. aureus*, CICC10384. Уровень ингибирования раствором композита хитозан/нано- SiO_x против *E. coli* и *S. aureus* составлял 42.88 и 37.85% соответственно, а для раствора хитозана — 30.00 и 19.45% соответственно. Было показано, что формирование полупроницаемого композитного покрытия успешно поддерживало качество томатов за счет замедления потери влаги, газообмена и дыхания. Результаты показали, что пленка хитозан/нано- SiO_x замедляла потерю веса, общих растворимых сухих веществ, сохраняла титруемые кислоты и заметно продлевала срок хранения томатов.

В работе [27] оценили влияние хитозановых покрытий в сочетании с цеолитом на показатели качества при хранении томатов (*Lycopersicon esculentum* сорт FA-180 HAZERA) в холодильнике [27]. Покрытия наносили двукратным погружением плодов на 5 мин в пленкообразующие растворы, содержащие только хитозан (СД 83.2%), хитозан и Твин-80 (0.1%, мас./об.), хитозан и цеолит (3%, вес/вес). Плоды после покрытия высушивали в течение 1 ч при 25°C и далее хранили при 10°C в течение 37 сут. В покрытиях использовали хитозан в концентрации 1.5%, в качестве растворителя — 1%-ную молочную кислоту. Добавление цеолита и Твин-80 в раствор хитозана улучшало его обволакивающие свойства и задерживало созревание томатов. Никаких признаков грибкового поражения плодов без покрытия и с покрытием не наблюдали в период хранения при 10°C в течение 37 сут. Эффективность обработок для продления срока хранения плодов оценивали путем определения интенсивности дыхания, качественных характеристик и общего внешнего вида. Покрытия хитозана с цеолитом и хитозана с Твин-80 не представляли собой эффективного барьера, предотвращающего потерю веса в конце срока хранения, которая

составила 5.59 и 5.74%, а для покрытия только из хитозана — 8.45% [27].

Покрывтия из хитозана в сочетании с другими полисахаридами. Покрывтия на основе полисахаридов обладают прекрасной способностью образовывать полупроницаемые пленки на свежих фруктах. Комбинирование двух и более полимеров — самый простой способ получения полисахаридных пленок с лучшими функциональными свойствами [36].

Исследователи в работе [37] получали методом литья функциональные пленки из смеси биополимеров альгината натрия и карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) с добавлением различных концентраций картофельного крахмала. С помощью ИК-Фурье-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, сканирующей электронной микроскопии и термогравиметрии были исследованы химические, морфологические и термические характеристики полученных пленок. Физические, оптические, влагостойкие, механические и барьерные свойства анализировали в зависимости от концентраций альгинат/КМЦ и крахмала. Повышенная концентрация крахмала (50%) способствовала улучшению защиты от УФ-излучения, кислорода и водяного пара, а также уменьшению содержания влаги и увеличению длины пленки. Пленки с содержанием крахмала 50% имели равномерную толщину, повышенную термостойкость и высокую прочность на разрыв. Было показано, что пленка способна увеличить срок годности плодов винограда после сбора урожая до 16 сут, что подтвердило перспективу использование таких пленок.

В работе [28] авторы получили и исследовали пищевое покрытие на основе КМЦ с ММ 90 кДа (числовая) и степенью замещения (СЗ) 0.75 альгината (А) и производного гидрохлорида хитозана с бигуанидином (ГБХ). Для синтеза производного использовали хитозан с ММ 160 кДа (вязкостная), СД 94%. Полученное производное было использовано в качестве сшивающего агента в концентрации 5, 10 и 15% при формировании пленок. Методом ИК-Фурье-спектроскопии подтвердили получение пленок, в составе которых присутствовали три полисахарида. Широкоугольная дифракция рентгеновских лучей показала, что аморфная структура КМЦ/А приобретала некоторую степень упорядоченности после добавления ГБХ. По результатам термографического анализа добавление ГБХ значительно улучшило тепловые свойства пленок и не изменило прозрачность пленок КМЦ/А. Механические и антибактериальные свойства относительно *Streptococcus pneumonia* (RCMB010010), *Bacillus subtilis* (RCMB010067) и *E. coli* (RCMB010052) были значительно улучшены после добавления производного хитозана в тестируемых концентрациях в пленкообразующий раствор, которым покрывали плоды томатов методом погружения (несколько раз). В качестве

примера был выбран пленкообразующий раствор с КМЦ/А/15%ГБХ благодаря превосходным антибактериальным свойствам. Зоны ингибирования бактерий *S. pneumonia*, *B. subtilis* и *E. coli* составляли 15.68, 14.48 и 11.56 мм соответственно, при использовании ампициллина — 23.80 и 32.40 мм относительно *S. pneumonia* и *B. subtilis*. Томаты с покрытием продемонстрировали значительно меньшую потерю веса (приблизительно в 5 раз) по сравнению с контролем в конце срока хранения (на 20 сут), и порча плодов после нанесения покрытия замедлялась. По мнению авторов, этот результат может быть связан с повышением барьерных свойств покрытия благодаря увеличению степени сшивки производным хитозана.

В работе [38] получали и исследовали пленки на основе пектина (ММ 111.1 кДа, степень этерификации 48.36%) и хитозана (ММ 70 кДа, СД 90%) в форме наносuspензии, полученной методом полимеризации раствора хитозана (0.8%) в метакриловой кислоте (0.5%), в соотношении пектин : нанохитозан: 100 : 0; 75 : 25; 50 : 50; 25 : 75 и 0 : 100 (масс.%). Пленкообразующие suspension пектин : нанохитозан ингибировали рост *Colletotrichum gloeosporioides*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Aspergillus niger* и *E. coli*. Оказалось, что пленка, состоящая только из пектина, не оказывала ингибирующего действия на исследуемые микроорганизмы. Антимикробные свойства пленкообразующих растворов улучшались при увеличении содержания наносuspензии хитозана с 25 до 50%. Антимикробная активность наносuspензии хитозана объяснялась особыми размерными характеристиками наночастиц и высоким поверхностным зарядом. Авторы полагали, что причина меньшей ингибирующей способности пленки пектин : нанохитозан (25 : 75) по сравнению с пленкой с соотношением 50 : 50 возможно вызвана агрегацией и неравномерным распределением нанохитозана, что приводило к уменьшению контактов между нанохитозаном и микробной поверхностью. Смешивание пектина с нанохитозаном приводило к улучшению механических, барьерных и гидрофильных свойств. На хорошее взаимодействие пленкообразующих компонентов для пленок пектин : нанохитозан в соотношении (50 : 50) указывали спектры ИК-спектроскопии с нарушенным полным внутренним отражением и изображения сканирующей электронной микроскопии. Авторы считают, что получение пленки пектин : нанохитозан — это новый подход к разработке активной упаковки для продления срока годности пищевых продуктов [38].

Покрывтия из хитозана в сочетании с другими функциональными соединениями. Добавление фенольных соединений, эфирных масел и экстрактов фруктов в пленки на основе полисахаридов существенно повышает их антиоксидантные и антимикробные свойства, способствует продлению срока

годности и сохранению качества продукции [39]. На антиоксидантную активность покрытий сильное влияние может оказывать эффект взаимодействия между различными компонентами.

Было разработано покрытие на основе хитозана (ММ 190–310 кДа, СД 75–85%) и экстракта семян грейпфрута (ЭСГ) [29]. Известно, что ЭСГ является функциональным материалом, содержащим различные биологически активные компоненты, такие как флавоноиды, полифенолы, органические кислоты и другие, которые, как считается, отвечают за противомикробную и антиоксидантную активность. Томаты черри (*Koko*) после сбора урожая покрывали пленкой погружением в 1%-ный коллоидный раствор хитозана, который содержал Твин-20 (в количестве 25% от массы ЭСГ). Исследовалось присутствие ЭСГ в концентрации 0.5, 0.7, 1.0 и 1.2% в коллоидном растворе хитозана. Покрытия с ЭСГ (1.0%) эффективно ингибировали рост сальмонелл в присутствии трех штаммов *Salmonella typhimurium* (CCARM 8164), *Salmonella enteritidis* (CCARM 8040) и *Salmonella montevideo* (CCARM 8052), снижали образование CO₂ и замедляли снижение титруемой кислотности в условиях хранения при 10 и 25°C. При включении ЭСГ в состав пленок была продемонстрирована задержка роста микроорганизмов со снижением потери веса при 25°C. Покрытие хитозан-ЭСГ не влияло на концентрацию ликопина, цвет и органолептические свойства плодов. Результаты, полученные в этом исследовании, показали, что использование коллоидного покрытия хитозан-ЭСГ может быть эффективной послеуборочной технологией защиты плодов томатов черри от сальмонеллы и поддержания их качества [40].

В работе [30] были получены покрытия на основе хитозана (СД 85%) и ванилина — фенольного альдегида, обладающего антимикробными свойствами. Водные растворы ванилина смешивали с тремя растворами хитозана разной концентрации с образованием покрытий: 0.5% хитозан + 10 мМ ванилин; 1.0% хитозан + 10 мМ ванилин; 1.5% хитозан + 10 мМ и 0.5% хитозан + 15 мМ ванилин; 1.0% хитозан + 15 мМ ванилин; 1.5% хитозан + 15 мМ ванилин. Все покрытия содержали 0.1% Твин-20. Авторы тестировали физико-химические качества плодов томатов в период хранения при 26±2 °C и относительной влажности 60±5% с интервалом в 5 сут. Результаты показали, что покрытие 1.5% хитозана + 15 мМ ванилина способствует снижению заболеваемости плодов на 74.16% и тяжести заболевания на 79%, задержке в потери веса до 90% и уменьшению изменений твердости плодов, а также концентрации растворимых твердых веществ и цветности. Покрытие также снижало интенсивность дыхания и скорость образования этилена по сравнению с контролем и томатами, обработанными 0.5% хитозаном + 10 мМ ванилина.

Кроме того, содержание аскорбиновой кислоты и антиоксидантные свойства томатов были сохранены, а срок хранения продлен до 25 сут.

Эфирные масла лимона, апельсина, мандарина, гвоздики, эвкалипта, мяты — это ароматические маслянистые вещества, обладающие антимикробными и антиоксидантными свойствами [41]. В сочетании с хитозаном эфирные масла оказывают хорошее защитное действие на послеуборочной стадии хранения овощей и фруктов, сводя к минимуму дыхание плодов и уменьшая скорость потери воды.

В работе [5] использовали хитозан с ММ 190–310 кДа и СД 85% в сочетании с эфирным маслом руты (*Ruta graveolens*) для послеуборочной обработки томатов сорта “Chonto” (*Solanum lycopersicum* L.) методом погружения. Полученные результаты оценивали в течение 12 сут в условиях охлаждения (4 ± 0.2°C). Для получения пленкообразующей суспензии хитозан растворяли в 0.1 М уксусной кислоте, получали 2%-ный раствор (масса/об.) и добавляли глицерин (2.5% об./об.), Твин-80 (1% об./об.) и эфирное масло (0.5, 1.0 и 1.5% об./об. по отношению к раствору хитозана). Было исследовано влияние таких покрытий хитозана в сочетании с эфирным маслом на физико-химические свойства плодов томата на 0, 3, 6, 9 и 12 сут хранения. Авторы отмечали, что противогрибковая активность такого покрытия сильно зависела от содержания эфирного масла. Противогрибковый механизм действия эфирных масел, по мнению авторов, может быть связан с их диффузией внутрь клеток. Было исследовано влияние покрытия из хитозана с разным содержанием эфирного масла на концентрацию аэробных мезофильных бактерий и количество плесеней на томатах. Авторы показали, что покрытие из хитозана с добавлением 1.5% эфирного масла руты обладало барьерным эффектом, предотвращало гнивание плодов, демонстрировало меньшую потерю веса (17%) в конце срока хранения, по сравнению с непокрытыми плодами (30%). Индекс зрелости плодов показал достоверные различия между непокрытыми (12.65%) и покрытыми пленкой плодами из хитозана с содержанием 1% эфирного масла (10.21%) на 12 сут. По мнению авторов, исследованные покрытия могут быть перспективными для послеуборочной обработки томатов “Chonto”.

В работе [31] было изучено влияние пищевого покрытия, состоящего из крахмала маниоки и хитозана с добавлением эфирного масла перца и розмарина *Lippia sidoides* Cham, а также экстракта кожуры граната, на срок годности томатов, которые хранили при температуре 25°C в течение 12 сут. Для исследования получили 16 вариантов покрытий, содержащих крахмал маниоки 10 г/л, хитозан в концентрации 5, 10, 20 и 30 г/л, эфирное масло 0, 2.5, 5 и 10 мл/л и экстракт кожуры граната 0, 5, 10 и 20 мл/л. Плоды погружали в каждый состав,

сушили при комнатной температуре в течение 30 мин. Результаты оценивали на 1, 4, 8 и 12 сут. Томаты, покрытые составом, содержащим 10 г/л крахмала маниоки, 10 г/л хитозана, 10 мл/л эфирного масла и 20 мл/л экстракта кожуры граната продемонстрировали наименьшую потерю веса, снижение общего содержания растворимых веществ, сохраняли постоянную твердость по сравнению с непокрытыми плодами. Такое покрытие имеет потенциал для использования в будущем в качестве биоактивной упаковки. Однако необходимы дальнейшие исследования для оценки органолептических параметров томатов (*Lycopersicon esculentum* Mill) с предлагаемым покрытием и безопасности потребления их человеком.

В работе [42] был получен композитный материал на основе двух биополимеров: хитозана (ММ 450 кДа, СД 75–85%) и КМЦ (ММ 41 кДа), сшитый глутаровым диальдегидом с добавлением эфирного масла корицы и олеиновой кислоты. Гидрофильные свойства пленок, сформированных только из хитозана и КМЦ, могут ограничивать их использование. Получение пленок на основе этих двух биополимеров с введением глутарового диальдегида уменьшало их гидрофильные свойства и увеличивало гидрофобные. Использование сшивающего агента способствовало формированию плотной структуры пленок с повышенной механической прочностью и пониженной паропроницаемостью. Межмолекулярные взаимодействия в матрице на основе хитозана-КМЦ в присутствии различных добавок были изучены методом ИК-Фурье-спектроскопии. Добавление эфирного масла корицы улучшало антиоксидантные свойства пленок, а введение олеиновой кислоты предотвращало появление влаги. Наибольшая противомикробная активность наблюдалась у композитных пленок с добавлением эфирного масла корицы *in vitro* в отношении *Listeria monocytogenes* и *Pseudomonas aeruginosa*. Гидрофобная природа эфирного масла корицы способствовала более легкому проникновению композитного материала в фосфолипидный бислой бактерий, что приводило к разрушению клеточной стенки и к вытеканию внутриклеточного содержимого. Было отмечено, что олеиновая кислота ослабляла физические и механические свойства пленки из хитозана с КМЦ. Снижение механических свойств, как полагают авторы, связано с образованием пор вдоль поверхности, что указывало на псевдогидрофильный характер покрытий. Композитные пленки, приготовленные в этой работе, за исключением пленки с олеиновой кислотой, являются хорошими кандидатами на продление сроков годности скоропортящихся продуктов.

В работе [43] были разработаны и получены активные пленки на основе хитозана (ММ 50 кДа, СД 90.27%), гуммиарабика из *Acacia senegal*

(ММ 300 кДа) — полисахарида, имеющего отличные эмульгирующие свойства, и эфирного масла корицы. Исследовано влияние соотношения обоих разноименно заряженных полимеров на структуру пленки, физические и антиоксидантные свойства. Взаимодействия между полимерами и эфирным маслом корицы оценивали с помощью реологических исследований, ИК-Фурье-спектроскопии и метода рентгеновского дифракционного анализа. Результаты показали, что существуют электростатические взаимодействия между хитозаном и гуммиарабиком, которые приводят к образованию сложной структуры. Усиление антиоксидантной способности пленки наблюдали при изменении соотношения хитозан/гуммиарабик от 1 : 0 до 1 : 2, а при содержании компонентов 1 : 4 она быстро снижалась, что могло быть связано, как полагают авторы, с негативным влиянием взаимодействий между хитозаном и гуммиарабиком, которое приводило к потере основного антиоксиданта — эфирного масла корицы. Авторы статьи считают, что необходимо изучение биохимических и физиологических реакций при взаимодействии свежих продуктов с полученными пленками.

По результатам исследований ряда авторов использование покрытий для свежих фруктов и овощей на основе хитозана, а также в сочетании с полисахаридами и другими функциональными соединениями технологически оправдано и имеет преимущества, обусловленные их природным происхождением, доступностью сырья, биологическим разложением, малой токсичностью и безопасностью для потребителей и окружающей среды.

Для улучшения свойств покрытий и продления срока хранения продукции в хитозановые пленки добавляли наночастицы оксидов металлов. Комбинирование хитозана с другими полисахаридами, фенольными соединениями, эфирными маслами и экстрактами фруктов способствовало усилению антиоксидантных, антимикробных свойств композитных пленок.

Авторы в своих исследованиях для формирования покрытий из пленкообразующих растворов в основном использовали хитозан ракообразных в концентрации 1% в 1%-ной уксусной кислоте со средней ММ, в некоторых работах использовали хитозан с низкой ММ и преимущественно со степенью деацетилирования 75–85%. Обработку плодов томата чаще осуществляли методом погружения в пленкообразующий раствор на несколько минут в обычных условиях.

Для улучшения свойств покрытий и продления срока хранения продукции в хитозановые пленки добавляли наночастицы оксидов, эфирные масла, производные фенола [23, 29, 30].

Следует отметить, что большинство покрытий преимущественно снижали потерю веса у плодов томата по сравнению с непокрытыми плодами. Так,

в результате использования 1%-ного раствора хитозана с ММ 50–190 кДа и СД 75–85% потеря веса к концу срока хранения при 21°C и влажности 65% была в 2 раза меньше. При использовании хитозана ММ 190–310 кДа, СД 75–85% с добавлением 1%-ного экстракта семян грейпфрута не отмечали потери веса во время хранения при 25°C в течение 21 сут. При добавлении ванилина (15 мМ) в покрытие из хитозана (1.0–1.5%) отмечали потерю веса на 4.5%, в то время как в необработанных контрольных образцах на 12.6%, в условиях хранения ($26 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $60 \pm 5\%$) в течение 25 сут.

Применение большинства хитозановых покрытий в больших масштабах и введение их в послеуборочную коммерческую практику в настоящее время не проводилось. Нужны дальнейшие исследования композитных хитозановых покрытий, содержащих наноматериалы, а также уточнения типов пищевых продуктов, которые могут взаимодействовать с используемыми покрытиями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ. Данная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arah I. K., Amaglo H., Kumah E. K., Ofori H. // *Int. J. Agron.* 2015. V. 2015. P. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2015/478041>
- FAOSTAT, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize> (accessed June 19, 2023).
- Panno S., Davino S., Caruso A. G., Bertacca S., Crnogorac A., Mandić A., Noris E., Matić S. // *Agronomy.* 2021. V. 11 № 11. P. 2188. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112188>
- Hua L., Yong C., Zhanquan Z., Boqiang L., Guozheng Q., Shiping T. // *Food Qual. Saf.* 2018. V. 2. № 3. P. 111–119. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy016>
- Peralta-Ruiz Y., Tovar C. D.G., Sinning-Mangonez A., Coronell E. A., Marino M. F., Chaves-Lopez C. // *Polymers.* 2020. V. 12. № 8. P. 1822. <https://doi.org/10.3390/polym12081822>
- Rizwana H., Bokahri N. A., Alsahli S. A., Al Showiman A. S., Alzahrani R. M., Aldehaish H. A. // *Saudi J. Biol. Sci.* 2021. V. 28. № 4. P. 2236–2244. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2021.01.014>
- Hernández-Lauzardo A.N., Velázquez-del Valle M. G., Veranza-Castelán L., Melo-Giorgana G.E., Guerra-Sánchez M.G. // *Fruits.* 2010. V. 65. № 4. P. 245–253. <https://doi.org/10.1051/fruits/2010020>
- Li Z., Jennings A. // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2017. V. 14. № 7. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070826>
- Bakshi P. S., Selvakumar D., Kadirvelu K., Kumar N. S. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2020. V. 150. P. 1072–1083. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2019.10.113>
- Maliki S., Sharma G., Kumar A., Moral-Zamorano M., Moradi O., Baselga J. et al. // *Polymers.* 2022. V. 14. № 7. <https://doi.org/10.3390/polym14071475>
- Krasnow C., Ziv C. // *Agronomy.* 2022. V. 12. № 1. P. 216. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010216>
- Chiu T., Poucet T., Li Y. // *Synth. Syst. Biotechnol.* 2022. V. 7. № 4. P. 1075–1083. <https://doi.org/10.1016/J.SYNBIO.2022.06.009>
- Naveed M., Phil L., Sohail M., Hasnat M., Baig M. M.F.A., Ihsan A. U. et al. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 129. P. 827–843. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.01.192>
- Duan C., Meng X., Meng J., Khan M. I.H., Dai L., Khan A. et al. // *J. Bioresour. Bioprod.* 2019. V. 4. № 1. P. 11–21. <https://doi.org/10.21967/JBB.V4I1.189>
- Ngo D.-H., Kim S.-K. // *Adv. Food Nutr. Res.* 2014. V. 73. P. 15–31. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800268-1.00002-0>
- Romanazzi G., Gabler F. M., Margosan D., Mackey B. E., Smilanick J. L. // *Phytopathology.* 2009. V. 99. № 9. P. 1028–1036. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-99-9-1028>
- Ke C.-L., Deng F.-S., Chuang C.-Y., Lin C.-H. // *Polymers.* 2021. V. 13. № 6. P. 904. <https://doi.org/10.3390/polym13060904>
- Dutta P. K., Tripathi S., Mehrotra G. K., Dutta J. // *Food Chem.* 2009. V. 114. № 4. P. 1173–1182. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2008.11.047>
- Kumar S., Mukherjee A., Dutta J. // *Trends Food Sci. Technol.* 2020. V. 97. P. 196–209.0 <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2020.01.002>
- Priyadarshi R., Sauraj, Kumar B., Deebe F., Kulshreshtha A., Negi Y. S. // *Food Hydrocoll.* 2018. V. 85. P. 158–166. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.07.003>
- Flórez M., Guerra-Rodríguez E., Cazón P., Vázquez M. // *Food Hydrocoll.* 2022. V. 124. P. 107328. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.107328>
- Liu J., Tian S., Meng X., Xu Y. // *Postharvest Biol. Technol.* 2007. V. 44. № 3. P. 300–306. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2006.12.019>
- Fatma Kibar H., Sabir F. K., Kibar H. F., Sabir F. K. // *AIMS Agric. Food.* 2018. V. 3. № 2. P. 97–108. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2018.2.97>
- Li Y., Zhou Y., Wang Z., Cai R., Yue T., Cui L. // *Foods.* 2021. V. 10. № 12. P. 3135. <https://doi.org/10.3390/foods10123135>
- Kaewklin P., Siripatrawan U., Suwanagul A., Lee Y. S. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2018. V. 112. P. 523–529. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.01.124>

26. Zhu Y., Li D., Belwal T., Li L., Chen H., Xu T., Luo Z. // *Molecules*. 2019. V. 24. № 24. P. 4552. <https://doi.org/10.3390/molecules24244552>
27. García M., Casariego A., Díaz R., Roblejo L. // *Emirates J. Food Agric.* V. 26. № 3. P. 238–246. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v26i3.16620>
28. Salama H. E., Abdel Aziz M. S., Alsehl M. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 139. P. 614–620. <https://doi.org/10.1016/j.IJBIOMAC.2019.08.008>
29. Won J. S., Lee S. J., Park H. H., Bin Song K., Min S. C. // *J. Food Sci.* 2018. V. 83. № 1. P. 138–146. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14002>
30. Safari Z. S., Ding P., Juju Nakasha J., Yusoff S. F. // *Coatings*. 2020. V. 10. № 12. P. 1222. <https://doi.org/10.3390/coatings10121222>
31. Araújo J. M.S., de Siqueira A. C.P., Blank A. F., Narain N., de Aquino Santana L. C.L. // *Food. Bioprocess. Technol.* 2018. V. 11. 1750–1760. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2139-9>
32. Ahmed S., Sameen D. E., Lu R., Li R., Dai J., Qin W., Liu Y. // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2022. V. 62. № 11. P. 3088–3102. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1863327>
33. Romanazzi G., Feliziani E., Sivakumar D. // *Front. Microbiol.* 2019. V. 9. P. 2745. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02745>
34. Batista Silva W., Cosme Silva G. M., Santana D. B., Salvador A. R., Medeiros D. B., Belghith I., et al. // *Food Chem.* 2018. V. 242. P. 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.052>
35. Tang Y., Hu X., Zhang X., Guo D., Zhang J., Kong F. // *Carbohydr. Polym.* 2016. V. 151. P. 752–759. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.06.023>
36. Deng J., Zhu E.-Q., Xu G.-F., Naik N., Murugadoss V., Ma M.-G. et al. // *Green Chem.* 2022. V. 24. № 2. P. 480–492. <https://doi.org/10.1039/D1GC03898B>
37. Ramakrishnan R., Kulandhaivelu S. V., Roy S., Viswanathan V. P. // *Ind. Crops Prod.* 2023. V. 193. P. 116114. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.116114>
38. Ngo T. M.P., Nguyen T. H., Dang T. M.Q., Tran T. X., Rachtanapun P. // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. № 6. <https://doi.org/10.3390/ijms21062224>
39. Dutta D., Sit N. // *J. Food Sci. Technol.* 2023. V. 60. P. 1888–1902. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05474-5>
40. Roy S., Zhang W., Biswas D., Ramakrishnan R., Rhim J.-W. // *Molecules*. 2023. V. 28. № 2. P. 730. <https://doi.org/10.3390/molecules28020730>
41. Shehata S. A., Abdeldaym E. A., Ali M. R., Mohamed R. M., Bob R. I., Abdelgawad K. F. // *Agronomy*. 2020. V. 10. № 10. P. 1466. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101466>
42. Valizadeh S., Naseri M., Babaei S., Hosseini S. M. H., Imani A. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 134. P. 604–612. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.071>
43. Xu T., Gao C., Feng X., Yang Y., Shen X., Tang X. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 134. P. 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.189>

Chitosan-based Functional Coatings for Postharvest Processing of Tomatoes

A. V. Il'ina^a, B. Ts. Shagdarova^{a,*}, A. A. Zubareva^a, and V. P. Varlamov^a

^aResearch Center of Biotechnology, Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119071 Russia

*e-mail: shagdarova.bal@gmail.com

The review article includes information on the use of coatings, both from chitosan itself and in combination with other polysaccharides and functional compounds, for postharvest processing, mainly of tomatoes, to extend the shelf life of harvested produce. During harvesting of fruits and vegetables, losses due to fungal infection can be as high as 50%. To prevent yield losses and preserve fruit quality, various methods of postharvest treatment are used. Currently, the most effective means used to control postharvest diseases are synthetic fungicides, but their uncontrolled use negatively affects human health and the environment. Recently, there has been a continuing trend to increase the use of natural antimicrobial agents. Such natural compounds can be chitin and chitosan, they are renewable, biodegradable, low toxicity and safe for consumers and the environment. The film-forming ability of chitosan and its antimicrobial, antioxidant properties are important for obtaining functional coatings for postharvest processing of fruits.

Keywords: chitosan, chitosan-nano-oxide coating, chitosan-polysaccharide coating, chitosan-active coating, antimicrobial properties, postharvest processing, tomato fruits