

Квасова Т.С.

аспирант кафедры технологии хранения и
переработки плодоовощной и
растениеводческой продукции,
ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА
имени К.А. Тимирязева

ОСОБЕННОСТИ МАСЛЯНОЙ ЭКСТРАКЦИИ КАПСАИЦИНОИДОВ И КАРОТИНОИДОВ ИЗ СТРУЧКОВОГО ПЕРЦА

Аннотация: В статье рассматриваются физико-химические особенности масляной экстракции биологически активных веществ из стручкового перца.

Ключевые слова: стручковый перец, масляная экстракция, капсаицин, каротиноиды.

Kvasova T. S.

postgraduate student of the Department
of Technology of Storage and Processing
of Fruit and Vegetable and Crop Products,
Russian State Agrarian University –
Timiryazev Moscow Agricultural Academy

FEATURES OF CAPSAICINOIDS AND CAROTENOIDS OIL EXTRACTION FROM CAPSICUM

Abstract: The article discusses the physico-chemical features of oil extraction of biologically active substances from capsicum.

Keywords: capsicum, oil extraction, capsaicin, carotenoids.

Введение

В условиях реализации политики импортозамещения и повышения требований потребителей к натуральности пищевых продуктов особое значение приобретает разработка технологий получения безопасных и функциональных

ингредиентов из отечественного растительного сырья. Стручковый перец (*Capsicum annuum* L.) является одним из наиболее ценных объектов переработки, поскольку содержит две уникальные группы биологически активных веществ: капсаициноиды, обуславливающие остроту и обладающие доказанными метаболическими и антиоксидантными свойствами, а также каротиноиды (капсантин, капсорубин, β -каротин), определяющие цветовую гамму от жёлтой до насыщенно-красной.

Традиционные формы использования стручкового перца — сушёный молотый порошок, паприка, а также спиртовые или масляные настои — имеют ряд технологических недостатков: неравномерность распределения в продукте, наличие твёрдых частиц, низкую точность дозирования остроты, ограниченную стабильность при хранении. Перспективным направлением является получение масляных экстрактов, которые могут выступать в качестве готовых к применению многофункциональных ингредиентов, сочетающих свойства натурального красителя, вкусоароматической добавки и антиоксиданта. Однако масляная экстракция сопряжена с фундаментальными физико-химическими ограничениями, связанными с различной растворимостью целевых компонентов в неполярной среде.

Физико-химические основы масляной экстракции стручкового перца

Масляная экстракция биологически активных веществ (БАВ) из плодов стручкового перца (*Capsicum annuum* L.) представляет собой процесс твердо-жидкостной экстракции, в котором растительные масла выступают одновременно экстрагентом и носителем целевых компонентов. Основу процесса составляют принципы «подобное растворяет подобное», гидрофобные взаимодействия и диффузионный массоперенос, что обеспечивает селективное извлечение липофильных БАВ при сохранении их стабильности в пищевой матрице

Главными целевыми соединениями в плодах стручкового перца являются капсаициноиды (капсаицин — транс-8-метил-N-ваниллил-6-ноненамид, $C_{18}H_{27}NO_3$, мол. масса 305,4 Да; дигидрокапсаицин и гомологи, составляющие до 90 % остроты), каротиноиды (капсантин, капсорубин, β -каротин), флавоноиды и токоферолы. Капсаицин — липофильный алкалоид с выраженной гидрофобностью, но хорошо растворимый в жирах, маслах и органических растворителях. Его молекула содержит длинный неполярный алкильный хвост и полярную ваниллильную группу, что обеспечивает амфифильность, но преимущественно липофильный характер. Каротиноиды — полностью неполярные тетратерпены, локализованные в хромопластах перикарпа и плаценты плода. [1]

Растительные масла (подсолнечное, оливковое, рапсовое, кунжутное и др.) — триглицериды ненасыщенных и насыщенных жирных кислот — характеризуются низкой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon \approx 2,5-3,5$), низким индексом полярности и высокой вязкостью (10–50 мПа·с при 20 °С). По параметрам растворимости Хансена масла близки к капсаициноидам и каротиноидам ($\delta \approx 16-18$ МПа^{1/2}), что обеспечивает термодинамически благоприятное растворение ($\Delta G < 0$ за счет энтропийного вклада гидрофобных взаимодействий и ван-дер-ваальсовых сил). Растворимость капсаициноидов в маслах варьирует в зависимости от типа масла: наибольшая — в кунжутном, оливковом и подсолнечном (до 1,3–1,4 млн по шкале Сковилла в экстрактах), что связано с различиями в составе жирных кислот и полярностью. [5]

Процесс масляной экстракции включает три основные стадии:

1. Пропитывание растительной матрицы — масло проникает в поры и клетки измельченного сырья (оптимальный размер частиц 0,5–2 мм для увеличения поверхности контакта).

2. Растворение БАВ — равновесие описывается коэффициентом распределения $K = C_{\text{масло}} / C_{\text{матрица}}$, зависящим от температуры по уравнению ван't Гоффа ($\ln K = -\Delta H/RT + \Delta S/R$). Растворение эндотермично, поэтому повышение температуры (40–70 °С) сдвигает равновесие вправо.

3. Диффузионный массоперенос — подчиняется закону Фика: $J = -D \nabla C$, где коэффициент диффузии D растет экспоненциально с температурой ($D = D_0 \exp(-E_a/RT)$, $E_a \approx 20\text{--}40$ кДж/моль для капсаицина в масле) и обратно пропорционален вязкости экстрагента. Высокая вязкость масел по сравнению со спиртами или ацетоном замедляет кинетику, однако применение ультразвука или микроволнового воздействия ускоряет процесс за счет кавитации и локального нагрева, повышая выход на 20–50 %.

Равновесие достигается за 15–120 мин в зависимости от гидромодуля (1:5–1:20), температуры и перемешивания. Выход капсаиноидов в маслах составляет 40–70 % от общего содержания в сырье, концентрация — 600–3600 мг/л, что достаточно для создания функциональных ингредиентов (ароматизированных масел, обогащенных БАВ). Одновременно извлекаются каротиноиды (0,66–0,92 мг/г в зависимости от типа масла), что придает экстракту окраску и дополнительную антиоксидантную активность.

Температурный режим критичен: выше 80 °С усиливается риск окисления ненасыщенных жирных кислот масла и частичной деградации каротиноидов (изомеризация), хотя капсаицин термостабилен до 210 °С. Оптимально 50–70 °С с инертной атмосферой или антиоксидантами (токоферолы самого перца). [4]

Таким образом, физико-химические основы масляной экстракции стручкового перца определяются липофильной природой целевых БАВ и экстрагента, что обеспечивает высокую селективность по неполярным соединениям, простоту технологического оформления (без стадии удаления растворителя) и получение функционального продукта — стабильного носителя

БАВ с пролонгированной биодоступностью. Ограничения связаны с вязкостью (снижение скорости массопереноса) и селективностью (потеря гидрофильных соединений), однако в рамках концепции «зеленой» экстракции и создания функциональных ингредиентов масла демонстрируют значительные преимущества перед традиционными органическими растворителями. Эти аспекты будут подробно рассмотрены в последующих разделах статьи при анализе возможностей и ограничений технологии.

Растительные масла как экстрагенты: теоретические основы и критерии выбора

В современной технологии переработки растительного сырья наблюдается устойчивый тренд на замену традиционных органических растворителей (гексан, ацетон, хлористый метилен) «зелёными» альтернативами. Растительные масла занимают в этом ряду особое положение, поскольку сочетают свойства экстрагента и функционального носителя биологически активных веществ [1].

Ключевыми преимуществами использования растительных масел являются:

- Экологическая безопасность. Масла не содержат токсичных примесей, не требуют специальных условий утилизации и не представляют опасности для оператора при соблюдении стандартных правил работы с пищевыми средами.
- Отсутствие стадии удаления экстрагента. В отличие от этанола, гексана или сверхкритического CO₂, растительное масло не требует отгонки из конечного продукта. Полученный масляный экстракт представляет собой готовый к применению ингредиент, что существенно сокращает технологическую цепочку и снижает энергозатраты.

- Совместимость с пищевыми системами. Растительные масла являются естественным компонентом большинства пищевых продуктов (соусы, мясные изделия, снеки, кондитерские жиры), что обеспечивает высокую технологическую совместимость и отсутствие органолептических конфликтов.

- Стабилизирующий эффект. Масляная фаза выполняет функцию защитной среды, изолирующей липофильные биологически активные вещества от контакта с кислородом и светом, что замедляет процессы окислительной деградации. [2]

Выбор типа растительного масла для экстракции определяет не только эффективность процесса, но и качество, стабильность и потребительские свойства конечного продукта. Система критериев включает физико-химические, технологические и органолептические параметры.

Растительные масла представляют собой сложные смеси триглицеридов, различающихся по длине и степени ненасыщенности жирнокислотных цепей. Жирнокислотный состав оказывает прямое влияние на:

- Растворимость капсаициноидов. Полярность масляной фазы возрастает с увеличением содержания короткоцепочечных и ненасыщенных жирных кислот. Масла с высоким содержанием линолевой кислоты (подсолнечное, кукурузное) обладают несколько большей растворяющей способностью по отношению к умеренно полярным соединениям, чем масла с преобладанием олеиновой (оливковое) или насыщенных (пальмовое) кислот.

- Вязкость и диффузионные характеристики. Масла с более низкой вязкостью обеспечивают более высокую скорость массопереноса. Вязкость коррелирует со степенью ненасыщенности и температурой.

- Окислительную стабильность. Высокненасыщенные масла (подсолнечное, льняное) более подвержены автоокислению, что может привести к ухудшению качества экстракта и деградации каротиноидов.

Для масляной экстракции стручкового перца предпочтительны масла со сбалансированным жирнокислотным составом, обеспечивающим достаточную экстракционную способность при приемлемой окислительной стабильности. [4]

Природные антиоксиданты, присутствующие в нерафинированных маслах, могут оказывать протекторное действие на извлекаемые каротиноиды и капсаициноиды. Наиболее значимыми являются:

- Токоферолы (витамин Е). Максимальное содержание характерно для подсолнечного (40–70 мг/100 г) и кукурузного (50–80 мг/100 г) масел. α -Токоферол и γ -токоферол проявляют синергизм в ингибировании цепных реакций окисления.
- Полифенольные соединения. Оливковое масло содержит значительное количество гидрокситирозола и олеуропеина, обладающих высокой антиоксидантной активностью.

Для получения экстрактов с длительным сроком хранения предпочтительны масла с высоким содержанием природных антиоксидантов. Однако следует учитывать, что рафинация и дезодорация, необходимые для получения нейтрального вкуса и запаха, снижают содержание этих защитных компонентов, что требует введения дополнительных антиоксидантов на стадии стабилизации. [3]

Эффективность масляной экстракции определяется совокупностью факторов: степенью разрушения клеточных стенок сырья, вязкостью масла, температурным режимом и гидродинамическими условиями. Для капсаициноидов лимитирующим этапом является растворение в масляной фазе.

Растворимость капсаицина в маслах

Одним из наиболее существенных технологических барьеров при разработке масляных экстрактов из стручкового перца является низкая растворимость капсаицина и его гомологов в триглицеридах растительных

масел. Эта проблема приобретает особую значимость в контексте создания комбинированных экстрактов, одновременно содержащих как капсаициноиды (острота), так и каротиноиды (цвет), поскольку последние, напротив, обладают высокой растворимостью в липидной среде.

Различие в растворимости обусловлено фундаментальными физико-химическими различиями между этими классами соединений. Понимание молекулярных механизмов, определяющих растворимость капсаицина, является необходимым условием для разработки эффективных технологических решений, направленных на её повышение.

Капсаицин (8-метил-N-ваниллил-6-ноненамид) является основным представителем капсаициноидов, на долю которого приходится около 70% от их общего содержания в плодах стручкового перца. Молекулярная структура капсаицина (рисунок 1) может быть представлена как состоящая из двух функционально различных фрагментов:

- Ваниллильная группа (ароматическое кольцо с гидроксильной и метоксильной группами) — полярный фрагмент, способный к образованию водородных связей
- Амидная связь — обеспечивает жёсткость структуры и также участвует в межмолекулярных взаимодействиях.
- Длинный углеводородный хвост (C9–C11 с одной двойной связью) — неполярный фрагмент, придающий молекуле амфифильные свойства. [1]

Способность к растворению в маслах несколько варьирует в зависимости от длины углеводородного радикала: более короткие цепи обладают несколько большей гидрофильностью, чем длинноцепочечные аналоги, однако принципиальных различий в растворимости не наблюдается.

В кристаллическом состоянии молекулы капсаицина образуют разветвлённую сеть водородных связей. Гидроксильная группа ваниллильного

фрагмента выступает донором водородной связи по отношению к карбонильной группе амидной связи соседней молекулы. Кроме того, амидная группа также участвует в образовании водородных связей ($N-H \cdots O=C$). Эта сеть водородных связей придаёт кристаллу капсаицина высокую прочность и требует значительных энергетических затрат для разрушения при растворении.

В масляной среде, состоящей преимущественно из неполярных триглицеридов, возможности для образования водородных связей крайне ограничены. Сложноэфирные группы триглицеридов ($R-COO-R'$) являются слабыми акцепторами водородных связей, однако их способность к образованию водородных связей существенно ниже, чем у карбонильных групп амидов или спиртовых гидроксидов. [1]

Способность различных масел растворять капсаицин неодинакова и коррелирует с их полярностью. Масла с более высоким содержанием короткоцепочечных и ненасыщенных жирных кислот проявляют несколько большую растворяющую способность.

При использовании традиционной мацерации без интенсификации достигается лишь малая доля от общего содержания капсаициноидов в сырье. Большая часть капсаицина остаётся в растительной матрице, что делает процесс неэффективным с экономической точки зрения. [3]

При охлаждении масляного экстракта, полученного при повышенной температуре, избыточный капсаицин может выпадать в осадок или образовывать кристаллические включения. Это приводит к:

- неоднородности продукта — неравномерному распределению остроты в партии;
- органолептическим дефектам — ощущению кристаллов при употреблении;

- нестабильности при хранении — прогрессирующему осаждению.

Ограниченная и зависящая от температуры растворимость создаёт трудности при разработке нормативной документации. Содержание капсаицина в масляном экстракте может варьировать в зависимости от температуры хранения и времени, что затрудняет обеспечение стабильных показателей качества. [2]

При использовании только масла как экстрагента без дополнительных технологических приёмов невозможно получить экстракты с высоким содержанием капсаицина (более 0,5–1,0%). Для создания концентрированных продуктов, востребованных промышленностью, требуются специальные технические решения. [6]

Применение масляных экстрактов стручкового перца в пищевых продуктах

Масляные экстракты стручкового перца представляют собой уникальный класс многофункциональных пищевых ингредиентов, сочетающих в себе свойства:

- натурального красителя (благодаря каротиноидному комплексу);
- вкусоароматической добавки (благодаря капсаициноидам, формирующим остроту);
- функционального компонента (антиоксидантная активность, потенциальные метаболические эффекты).

В отличие от традиционных форм использования перца (сушёный молотый перец, паприка), масляные экстракты обладают рядом технологических преимуществ:

- стандартизированность — возможность заданного уровня остроты и цвета;

- равномерность распределения в продуктах с жировой фазой;
- отсутствие твёрдых частиц — важно для продуктов с гладкой текстурой;
- пролонгированный срок хранения благодаря стабилизации в масляной среде.

Соусы являются одной из наиболее востребованных категорий для использования масляных экстрактов стручкового перца, поскольку острота и цвет являются ключевыми органолептическими характеристиками этой группы продуктов.

Майонезы и соусы на масляной основе

Технологические особенности:

- Экстракт легко вводится в масляную фазу майонеза на стадии эмульгирования.
- Дозировка варьирует от 0,1% (для «слабого» вкуса) до 0,8% (для острых соусов).
- Возможно создание линейки продуктов с различным уровнем остроты («Столовый», «Провансаль острый», «Чили»).

Преимущества перед использованием перца:

- отсутствие твёрдых частиц, нарушающих однородность эмульсии;
- стабильность цвета в процессе хранения;
- возможность точного дозирования остроты.

Кетчупы и томатные соусы

Технологические особенности:

- Экстракт вносится на стадии смешивания компонентов после термической обработки (при температуре не выше 50°C).
- Дозировка: 0,1–0,5% в зависимости от желаемой остроты.

- Сочетается с томатной пастой, усиливая красный цвет и придавая пикантность.

Преимущества:

- усиление натурального красного цвета томатной основы;
- придание «перечного» оттенка вкуса без изменения консистенции;
- возможность создания продуктов с регулируемой остротой («Кетчуп острый», «Кетчуп с перцем чили»).

Чипсы и экструдированные снеки

Способы внесения:

- Поверхностное нанесение (опрыскивание): экстракт растворяется в растительном масле (0,5–2,0% от массы масла) и наносится на готовый продукт после обжарки. Этот метод позволяет создать продукт с острым вкусом и характерным красным цветом поверхности.

- Внесение в рецептуру до экструзии: экстракт вводится в массу до формирования, что обеспечивает равномерное распределение вкуса и цвета по всему объему продукта.

Дозировки:

- Слабый вкус: 0,1–0,3% экстракта от массы продукта;
- Средний вкус: 0,3–0,6%;
- Интенсивный вкус: 0,6–1,2%.

Ассортимент:

- Картофельные чипсы со вкусом «Паприка», «Чили», «Острая паприка»;
- Экструдированные кукурузные снеки (шарики, палочки);
- Сухарики и гренки.

Применение в консервной промышленности:

- Овощные консервы: внесение в заливку (0,1–0,3%).

- Консервированный перец (лечо): экстракт может использоваться для усиления цвета и остроты.

- Маринованные овощи: добавление в состав маринада.

Антиоксидантные свойства капсаициноидов и каротиноидов способствуют замедлению окислительных процессов в консервах.

Масляные экстракты стручкового перца представляют собой многофункциональные ингредиенты, способные одновременно выполнять функции натурального красителя, вкусоароматической добавки и антиоксиданта в широком спектре пищевых продуктов. [5]

Наиболее перспективными категориями для применения являются: мясные и рыбные продукты (колбасы, паштеты, маринады), соусная продукция (майонезы, кетчупы, острые соусы), снековая продукция (чипсы, сухарики, орехи), молочные продукты (сыры, творожные массы) и масложировая продукция (обогащённые масла, спреды).

Заключение

Физико-химическая природа целевых компонентов определяет различные механизмы их извлечения. Каротиноиды, обладающие высокой липофильностью, хорошо растворимы в растительных маслах и не создают существенных барьеров для экстракции. Капсаициноиды, напротив, проявляют ограниченную растворимость в неполярных средах, что обусловлено амфифильной структурой их молекул, наличием полярной ваниллильной группы и амидной связи, способных к образованию водородных связей. Жирнокислотный состав масла также влияет на растворимость: масла с более высоким содержанием короткоцепочечных и ненасыщенных жирных кислот проявляют несколько большую растворяющую способность.

Эффективность масляной экстракции определяется совокупностью факторов, управляемых на этапах подготовки сырья, интенсификации процесса и модификации экстрагента.

Масляные экстракты стручкового перца представляют собой многофункциональные ингредиенты с широким спектром применения. Перспективы дальнейших исследований. Полученные в рамках настоящего обзора результаты создают основу для проведения экспериментальных исследований по оптимизации параметров комбинированных методов масляной экстракции стручкового перца.

Список литературы

1. Бойко Ю.А., Кравченко И.А., Богомольный Р.Б., Аяд М. Определение содержания капсаицина в разных сортах *Capsicum* и изучение противовоспалительной активности его спиртовых экстрактов // Химия растительного сырья. — 2014. — № 3. — С. 303–308.
2. Зиядуллаев А.Ш., Хусенов А.Б., Саноев А.И., Сагдуллаев Ш.Ш., Хамрокулов Г.Б. Изучение факторов, влияющих на процесс экстракции капсаицина из плодов острого перца рода *Capsicum* // E-Global Congress. — 2024.
3. Рудометова Н.В., Ким И.С. Исследование экстракции капсаицина из плодов острого перца рода *Capsicum* // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». — 2019. — № 1. — С. 62–73.
4. Avilés-Betanzos K.A. et al. Evaluation of the Capsaicinoid Extraction Conditions from Jalapeño Pepper (*Capsicum annuum*) Using Pressurized Liquid Extraction // Processes. — 2023.
5. Ichim T., Blaga A.C. Extraction methods of capsaicin — A review // BIP-CIC. — 2021.
6. Zheng B., Wu Y., Wang Y., Li Y. Application of Different Animal Fats as Solvents to Extract Capsaicinoids from Chili Pepper: A Comparative Study // Foods. — 2024.