

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.8.022

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ  
НА ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ ФРУКТОВЫХ КОНСЕРВОВ**

**Бурак Л.Ч.**

*ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Интерес к здоровому образу жизни и сбалансированному питанию в последние годы значительно возрос. В настоящее время потребитель отдает предпочтение свежим, минимально обработанным пищевым продуктам, что для предприятий пищевой отрасли способствует поиску новых методов и технологий, обеспечивающих максимальное сохранение пищевой ценности продуктов и их безопасность. Возрастает потребность в эффективных и экологически безопасных процессах, которые могли бы конкурировать и заменять при необходимости традиционные термические, химические методы обработки и консервирования пищевых продуктов. В последние два десятилетия широко изучается технология обработки высоким давлением (НРР) и возможность ее применения в производстве фруктовых соков, соков с мякотью, нектаров и пюре. Установлено, что действие высокого давления НРР способно инактивировать или активировать различные ферменты во фруктовых соках. В процессе обработки НРР инактивация ферментов происходит за счет изменения конформации структуры белка и активного центра. В то же время, в зависимости от вида фермента, давления, pH, температуры и времени обработки, воздействие технологии НРР может повышать активность фермента. Это происходит под действием процесса высвобождения мембраносвязанных ферментов, а также за счет изменений конформации белка и активного центра, которые облегчают взаимодействие с субстратом. Следует также отметить, что наиболее эффективно процесс инактивации ферментов во фруктовых соках и пюре происходит при совместном использовании технологии обработки высоким давлением, термическим воздействием и сокращении времени обработки. Цель данной статьи – обзор научных исследований по изучению кинетики инактивации эндогенных ферментов в процессе обработки высоким давлением фруктовых соков, нектаров и пюре.

**Ключевые слова:** ферменты, инактивация, активация, обработка, НРР, ферментативная активность, сок, нектар, пюре

**INFLUENCE OF HIGH-PRESSURE TECHNOLOGY  
ON THE ENZYMATIVE ACTIVITY OF CANNED FRUIT**

**Burak L.Ch.**

*LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Interest in a healthy lifestyle and a balanced diet has increased significantly in recent years. Currently, the consumer prefers fresh, minimally processed food products, which contributes to the search for new methods and technologies for food industry enterprises that ensure the maximum preservation of the nutritional value of products and their safety. There is a growing need for efficient and environmentally friendly processes that could compete and replace, if necessary, traditional thermal, chemical methods of processing and preserving food. In the past two decades, high pressure processing (HPP) technology has been extensively studied and its possible application in the production of fruit juices, juices with pulp, nectars and purees. High pressure HPP has been found to be able to inactivate or activate various enzymes in fruit juices. During HPP treatment, the inactivation of enzymes occurs due to changes in the conformation of the protein structure and the active site. At the same time, depending on the type of enzyme, pressure, pH, temperature and processing time, exposure to HPP technology can increase the activity of the enzyme. This occurs under the action of the process of release of membrane-bound enzymes, as well as due to changes in the conformation of the protein and the active site, which facilitate interaction with the substrate. It should also be noted that the process of inactivation of enzymes in fruit juices and purees is most effective with the combined use of high pressure processing technology, thermal exposure and reduction of processing time. The purpose of this article is to review scientific research on the study of the kinetics of endogenous enzyme inactivation during high pressure processing of fruit juices, nectars and purees.

**Keywords:** enzymes, inactivation, activation, processing, HPP, enzymatic activity, juice, nectar, puree

Высокая ферментативная и микробиологическая активность являются основными причинами ограниченного срока хранения свежих фруктов, плодов и ягод. Происходящие в свежем сырье физиологические, биохимические и метаболические реакции приводят к размягчению клеточных стенок, окислению, разложению и в итоге к микробиологической порче. Продукты переработки фруктового сырья также являются скоропортящимися, поскольку их качество в процессе хранения со временем ухудша-

ется в неблагоприятных условиях окружающей среды, таких как влажность, состав воздуха и температура. Также одним из важных факторов является то, что все биологические и химические процессы сырья (рост, созревание, антиоксидантная активность) связаны с действием ферментов [1]. В плодах ферменты играют важную роль в формировании физико-химических и органолептических показателей конечного продукта. После сбора урожая на качество сырья при хранении влияют активные

эндогенные ферменты и продолжение их ферментативной активности. Инактивация ферментов, предотвращение деградации и потемнения имеют решающее значение в процессе переработки и сохранения фруктового сырья. Обработка термическими методами, такими как пастеризация и стерилизация, эффективна для инактивации микроорганизмов и ферментов, вызывающих порчу, в то же время она влияет на внешний вид и органолептические показатели продукта [2]. Под действием температуры обычно разрушаются в первую очередь витамины и углеводы, происходит ухудшение органолептических показателей соков, таких как цвет, вкус и аромат. Хотя некоторые осветленные фруктовые соки, соки с мякотью, нектары и пюре незначительно изменяют вкус и пищевую ценность при термической обработке. Изменению вкуса и аромата способствует интенсивность нагрева, необходимая для инактивации термостабильных изоферментов, которые и снижают первоначальные вкусовые качества соков.

Интерес и покупательский спрос на высококачественные пищевые продукты, подвергающиеся незначительной обработке, побуждают производителей продуктов питания использовать традиционные методы обработки, осуществляемые при более низких температурах, или новые нетермические методы, такие как технология высокого давления [3]. Обработка под высоким давлением (НРП) – это инновационный нетермический метод, используемый в пищевой промышленности для различных целей, включая инактивацию микроорганизмов [4–6], повышение безопасности и качества [7], денатурацию белков [8], формирование гелеобразующих свойств [9], экстракцию биологически активных соединений [10, 11] и замену синтетических добавок [12]. В последние годы в этой области были достигнуты значительные успехи по инактивации ферментов потемнения и предотвращению порчи пищевых продуктов. Однако механизм действия НРП на различные ферменты фруктовых соков, нектаров и напитков на сегодняшний день изучен недостаточно. В настоящем обзоре нами рассматриваются принципы и механизмы передовых методов, используемые в технологии обработки высоким давлением (НРП) для инактивации ферментов, вызывающих потемнение и ухудшение качества, в процессе производства фруктовых соков и напитков.

### *1. Ферментативное потемнение соков*

Основной причиной изменения физико-химических и органолептических показате-

лей и ухудшения качества фруктовых соков является ферментативное потемнение из-за выработки оксидоредуктазы. Протекание каталитической реакции с образованием повышенного содержания перекиси водорода вызывает изменение цвета фруктовых соков [13]. Эндогенные ферменты – это такие ферменты, как полифенолоксидаза (ПФО), пероксидаза (ПОД), пектинметилэстераза (ПМЭ) и полигалактуроназа (ПГ). ПФО представляет собой медьсодержащий фермент оксидоредуктазу, который вызывает ферментативное потемнение и ухудшение цвета соков. Процесс включает в себя цепь окислительных реакций, таких как гидроксигидрирование монофенолов в дифенолы, а затем дифенолов в *o*-хиноны (желтого цвета). В присутствии молекулярного кислорода *o*-хиноны неферментативно реагируют с аминокислотами и белками с образованием накопленных черных, коричневых или красных соединений меланина, что впоследствии приводит к обесцвечиванию тканей и потере питательных веществ во фруктовых соках, в то время как ПОД является гемсодержащим ферментом, который вызывает появление неприятного вкуса и деградацию пигмента в пищевых продуктах [14]. Изоферменты ПОД (активированные перекисью водорода) катализируют одноэлектронную реакцию окисления фенольных соединений с образованием продуктов коричневого цвета. ПОД – один из наиболее термостабильных ферментов – обычно используется в качестве индикатора инактивации эндогенных ферментов и микроорганизмов во время тепловой обработки [15].

Пектинметилэстераза (ПМЭ) отвечает за гидролиз пектина, что приводит к нестабильности помутнения, а также снижает вязкость сока за счет деградации пектиновой цепи. ПМЭ присутствует во всех цитрусовых в виде связанного с клеточной стенкой фермента, образующего комплекс с пектином посредством электростатических взаимодействий. В процессе отжима сока ПМЭ высвобождается в сок, гидролизует пектин (метилловые эфиры гомогалактуронана) и постепенно превращает его в низкометокси пектин и пектиновые кислоты. Данный фермент образовывал нерастворимые комплексы с ионами кальция, что приводило к осаждению пектина и расслоению неосветленных соков или соков с мякотью. Также действие ферментов ПМЭ и ПГ связано с деэстерификацией пектина и гидролитическим расщеплением 1,4-гликозидных связей. ПМЭ и ПГ реагируют с пектиновыми веществами, расщепляя метилловые эфиры с образованием поли-*D*-галактурононовой кислоты, которая изменяет физическую

природу цитрусовых соков. Если эти ферменты не инактивировать, они в конечном итоге разрушат стабильность неосветленных соков из цитрусовых [16]. Группой зарубежных ученых в результате научных исследований установлено, что повышенная активность ПМЭ (остаточная активность  $RA > 90\%$ ) приводит к расслоению в процессе хранения неосветленных яблочных соков. Кроме того, высокая ферментативная активность тесно связана с сокращением срока годности (менее 6 недель) и пищевой ценности фруктовых соков [17]. Очень важно контролировать как активность, так и стабильность разрушающихся ферментов во время обработки пищевых продуктов, чтобы получать пищевые продукты высшего качества.

## 2. Механизм инактивации ферментов НРР

Технология обработки под высоким давлением широко используется в производстве соковой продукции для улучшения качества и микробиологической безопасности соков [18]. В настоящее время опубликовано множество исследований о значительном влиянии НРР на ферментативную активность различных фруктовых соков, в частности таких зарубежных ученых как Marszałek [14], Chen [19], Szczepańska [20], а также соков с мякотью, нектаров [21, 22], пюре, смузи и пасты. [23, 24]. В процессе обработки НРР к пищевым продуктам применяется давление в диапазоне 100–1000 МПа с подогревом или без него. НРР работает по принципу силового сжатия, применяемого к жидкости, окружающей продукт. Давление оказывает ограниченное влияние на ковалентные связи молекул с низкой молекулярной массой, таких как витамины, пигменты и летучие соединения, в отличие от молекул с высокой молекулярной массой, таких как белки/ферменты. Это объясняется сложной трехмерной структурой ферментов, которая стабилизируется различными ковалентными и нековалентными связями [25]. Процесс инактивации представляет собой цепочку, которая включает формирование и/или нарушение многочисленных взаимодействий и изменений в нативной структуре ферментов путем сворачивания и/или разворачивания. Кроме того, существенное влияние на инактивацию ферментов оказывает температура. Так, например, ПФО является термостойким ферментом, и оказалось, что он более лабилен к обработке (НРР + нагревание), чем ПОД. С другой стороны, ПМЭ принято считать устойчивым к давлению. Относительно ферментативной активности соков, обработанных НРР, в литературе можно

найти разные мнения, результаты весьма противоречивы. В качестве подтверждения этого, например, НРР при 400 МПа снижает активность РФО на 0,12 логарифмических цикла в яблочном соке [26], тогда как обработка НРР при 400–550 МПа увеличивает активность ПФО в 3 раза в виноградном соке [27]. Согласно результатам, которые получили авторы Juarez-Enriquez et al. [28], обработка НРР модифицировала активные центры ферментов, которые активируют ферменты или денатурируют их. Результаты зависят от различных путей денатурации, сопровождаемых ферментами. В частности, как поясняют авторы о Liu et al., технологический процесс обработки НРР нарушил вторичную структуру белка за счет разрыва водородных связей, что повлекло снижение ферментативной активности. Кроме того, повышение давления или температуры может усилить инактивацию ферментов. Кроме того, ферменты, инактивированные за счет проникновения воды в ядро белка, вызывая ослабление контакта между неполярными группами, приводили к сильному воздействию гидрофобных групп [29].

Антагонистический эффект давления и температуры может привести к структурным или конформационным изменениям ферментов и окружающего их слоя растворителя. Давление в пределах 400 МПа при термической обработке уменьшало молярный объем за счет образования гидрофобных взаимодействий как для полярных, так и для неполярных групп и водородных связей в гидратном слое [24]. Это увеличивает жесткость структуры фермента и в конечном счете ограничивает латеральные отклонения, возникающие перед термической денатурацией. В случае синергетического действия давления и температуры происходит необратимое разворачивание структуры фермента (третичной или четвертичной) при более высоком давлении. При обработке высоким давлением (500–600 МПа) спиральная структура фермента нарушается и становится неустойчивой. Ковалентные и нековалентные связи в ферментативной структуре повреждались при более высоких температурах (50–70 °С), что приводило к немедленной потере функциональности [30].

Активация фермента включает физические изменения веществ (фазовые переходы), обусловленные слабой связью между ферментом и контактной поверхностью вещества. Согласно результатам, полученным учеными Augusto et al., обработка НРР низким давлением (< 200 МПа) повышала активность фермента по сравнению с обработкой 300 МПа, что вызывало обратимые изменения в структуре белка. Во время

обратимой денатурации белков снижение давления вызывало медленный процесс рефолдинга белков, что увеличивало частичное/полное восстановление активности ферментов. Устойчивость ферментов к действию высокого давления можно обобщить как ПМЭ < ПФО < ПОД, что указывает на то, что ПОД обладает большей устойчивостью к давлению, чем ПФО и ПМЭ [29].

Другой причиной активации ферментов может быть высвобождение мембраносвязанных ферментов в процессе проведения обработки. Ученые G. Gao, L. Zhao, Y. Ma, Y. Wang, Z. Sun установили увеличение активности ПОД на 10,4% после обработки НРР (550 МПа в течение 10 мин) грейпфрутового сока. Авторы предположили, что увеличение активности может быть связано с повышенной экстрагируемостью ферментов из-за проницаемости мембраны, вызванной действием НРР. Кроме того, активация ферментов была связана с частичной денатурацией или связыванием изоферментов. Установлено, что в одних плодах могут быть изоферменты ПФО и ПОД, чувствительные к обработке давлением, а в других – стабильные. Таким образом, уязвимый вариант может

быть легко инактивирован обработкой давлением по сравнению со стабильным [31]. Подобные результаты также были получены учеными Rao et al., которые установили увеличение ПФО (7,3%) и ПМЭ (2,6%) в персиковом соке после обработки при 400 МПа (5–15 мин). По мнению авторов, увеличение активности ПФО связано с двумя формами фермента – активной и латентной, но латентная форма ПФО может стать активной во время обработки НРР. Точно так же увеличение активности ПМЭ было связано со структурным нарушением матрикса плодов во время обработки НРР, что высвобождало ПМЭ из матрикса [32]. Чтобы предотвратить процесс ухудшения качества, связанный с дальнейшей ферментативной реакцией после обработки и во время хранения, необходима полная и необратимая инактивация нежелательных ферментов, связанных с обесцениванием качества пищевого продукта.

### 3. Применение обработки высоким давлением (НРР) во фруктовых соках

Результаты влияния процесса обработки НРР некоторых фруктовых соков обобщены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние НРР на ферментативный профиль фруктовых соков

Наименование сока	Ферменты	Параметры НРР	Сравнение или комбинирование с другими методами обработки	Результат воздействия на ферменты	Источник
Манго	ПФО, ПОД и ПМЭ	400 МПа в течение 10 мин	По сравнению с ТС (250 Вт в течение 10 мин при 25–95 °С).	ПФО: 98,18% ОА, ПОД: 93,26% ОА, ПМЭ: 96,46% ОА	[33]
Черника	ПФО и ПОД	200–600 МПа в течение 5 мин	В сочетании с ТС (40 кГц и 240 Вт при 25–45 °С) в течение 15 мин	ПФО: ~60% ОА после 600 МПа, ПОД: ~30% ОА после 600 МПа	[19]
Голубика ( <i>Vaccinium corymbosum</i> )	ПФО	350 МПа в течение 5–20 мин	По сравнению / в сочетании с ТП (80 °С), ТЗ (40 °С, 560 Вт), МТ (350 МПа, 40 °С), МС (560 Вт, 5 мин/350 МПа) или МТС (560 Вт, 5 мин, 40 °С/350 МПа, 40 °С) в течение 5–20 мин	24,03% и 10,91% ОА оставались после обработки МС и МТС в течение 5 мин соответственно, а затем снижались до 4,56% и 0,12% ОА для МС и МТС соответственно через 10 мин	[34]
Персик ( <i>Prunus persica</i> )	ПФО и ПМЕ	400–600 МПа в течение 5–25 мин при 25 °С	По сравнению с ТП (90 °С в течение 1 мин)	ПФО: инактивация 54,9–18,8%, ПМЭ: инактивация 81,2–49,6%	[32]
Белый виноград	ПФО и ПОД	От 300 до 600 МПа в течение 3 мин	По сравнению с ТП (90 °С в течение 60с)	ПФО: 51,2% инактивация, ПОД: 6,8% инактивация	[35]
Грейпфрут	ПМЭ и ПФО	150–250 МПа в течение 3 мин при 40–60 °С		< 10% ОА	[36]

Окончание табл. 1

Наименование сока	Ферменты	Параметры НРР	Сравнение или комбинирование с другими методами обработки	Результат воздействия на ферменты	Источник
Грейпфрут	ПМЭ и ПОД	550 МПа в течение 10 мин при 25 °С	По сравнению с ТП (110 °С в течение 8,6 с)	ПМЭ: инактивирован на 22,5 %, ПОД: увеличен на 10,4 %	[31]
Сок облепихи	СОД	500 МПа в течение 6 мин	По сравнению с ТП (100 °С в течение 15 с)	Активация 17,1 %	[37]
Арбузный сок	ПФО, ПОД, и ПМЭ	200–600 МПа в течение 5–60 мин		ПФО: 12,3 % ОА при 30 МПа в течение 60 мин, ПОД: 57,6 % ОА при 30 МПа в течение 60 мин, ПМЭ: 23,2 % ОА при 600 МПа в течение 60 мин	[38]
Яблочный сок	ПГ	Статическое давление 300, 450 и 600 МПа в течение 5 мин и многоимпульсное давление (300 МПа × 3 импульса, 5 мин каждый импульс; всего 15 мин)		На 12-й неделе ОА снизилась на 14,9 % и 18,8 % для 450 МПа и 600 МПа соответственно, тогда как мультиимпульсное давление вызвало снижение ОА на 6,5 %	[20]
Яблочный сок	ПФО и ПМЭ	430 МПа при 20 °С в течение 7 мин		ПМЭ был полностью инактивирован. ПФО был частично денатурирован и полностью инактивирован во время лечения НРР, но частично восстанавливался через 2 недели	[25]
Яблочный сок	ПФО, ПМЭ и ПОД	250 МПа, 10 мин		ПОД: 81,93 % ОА, ПФО: 75,46 % ОА, ПМЭ: 77,63 % ОА	[39]
		350 МПа 10 мин		ПОД: 69,56 % ОА, ПФО: 60,17 % ОА, ПМЭ: 62,50 % ОА	
		450 МПа, 10 мин		ПОД: 51,22 % ОА, ПФО: 46,13 % ОА, ПМЭ: 48,93 % ОА	
		250–450 МПа, в течение 10 мин	В сочетании с ультразвуковой обработкой частотой 25 кГц и амплитудой 70 % в течение 60 мин	ПОД: 70,99–32,67 % ОА, ПФО: 63,87–21,13 % ОА, ПМЭ: 66,12–23,93 % ОА	
Неосветленный яблочный сок	ПФО и ПОД	400–600 МПа в течение 3 мин при комнатной температуре	По сравнению с ТП (72 °С/15 с; 85 °С/30 с) и РЕФ (12,5 кВ/см, 76,4 кДж/л; 12,3 кВ/см, 132,5 кДж/л)	ПФО: 100 % ОА, ПОД: 98 % ОА. В то время как снижение активности ПФО и ПОД наблюдалось при хранении в холодильнике в течение 3 недель. ПМЭ: 90 % ОА	[16]
Апельсиновый сок	ПМЭ и ПОД	600 МПа в течение 1 мин	По сравнению с ТП (85 °С в течение 1 мин), обработкой РЕФ (25 кВ/см при 65 °С)	ПМЭ: 8 % ОА, ПОД: 86,9 % ОА	[40]

Примечания: НРР – обработка под высоким давлением; МС – маносонизация; МТ – манотермальный; МТС – манотермозондирование; РЕФ – импульсное электрическое поле; ПГ – полигалактуроназа; ОА – остаточная активность; СОД – супероксиддисмутаза; ТП – термическая пастеризация; ТЗ – термозвук.

Термическая обработка показала преимущества с точки зрения полной инактивации ПФО и ПОД в яблочном соке, но вместе с тем она вызывала нежелательные изменения цвета и вкуса яблочного сока. Обработка НРР эффективнее сохраняет естественный цвет яблочного сока по сравнению с термической обработкой, но соки, обработанные НРР, имеют ограниченный срок хранения из-за остаточной ферментативной активности, которая может вызывать нежелательные изменения цвета и вкуса при хранении. Незначительное влияние НРР на активность ПФО, ПОД и ПМЭ наблюдалось в неосветленном яблочном соке по сравнению с термической обработкой и технологией импульсного электрического поля [16]. Было высказано предположение, что соединения полифенолов либо взаимодействуют с молекулами белка с образованием неактивного комплекса фермент-субстрат, либо изменяют каталитический центр, тем самым предотвращая реакцию фермента с субстратом. Дальнейшее снижение активности ПФО и ПОД наблюдалось при хранении в холодильнике в течение 3 недель. В большинстве исследований подчеркивается значительное влияние НРР на инактивацию ферментов, однако имеются сведения об ограниченной стабильности при хранении фруктовых соков, обработанных НРР. Следует отметить, что ПФО так же полностью инактивировался в яблочных соках, обработанных НРР (430 МПа в течение 7 мин), но частично восстанавливался (до 20% его активности) через 2 недели. Однако третичная структура РРО была изменена; таким образом, он не вступал в реакцию с фенольными соединениями и не вызывал потемнения хранящегося сока [16]. Авторы исследования объяснили, что окисление уменьшает количество субстрата, присутствующего в продукте, и продукты окисления могут ингибировать активность фермента. Точно так же низкая активность ПОД наблюдалась во время хранения, что объяснялось окислением фенольных соединений, таких как катехин, и приводило к образованию продуктов окисления, таких как дегидрокатехин, которые препятствовали дальнейшей реакции фермента.

Авторы исследования Marszałek et al. установили, что давление оказывает более значимое влияние на активность ПОД и ПФО по сравнению со временем обработки и температурой. НРР при 600 МПа вызывал полную инактивацию ПФО и 58% инактивацию ПОД. Однако менее значительно обработка НРР при 200 и 400 МПа влияет на активность фермента. Принимая во внимание время как влияющий параметр, было

замечено, что увеличение времени нагнетания давления существенно не повлияло на активность ПФО и ПОД. Что касается температуры обработки, был сделан вывод, что 45 °С неблагоприятна для промышленного применения и с точки зрения качества продукта питания, а обработка при 5 °С увеличивает себестоимость продукции. Таким образом, 25 °С была оптимальной температурой обработки для НРР-обработки неосветленных яблочных соков. Как видно из обобщенных результатов табл. 1, обработка НРР требовала больше времени для снижения (ниже 10%) остаточной активности (ОА) ПФО и ПМЭ в персиковом соке по сравнению с термической обработкой. Кроме того, комбинация НРР с другими методами обработки, такими как термическая обработка под давлением, может использоваться для достижения более эффективной инактивации ферментов [34]. При повышении температуры до 50 °С давлением 600 МПа наблюдали повышенную инактивацию ПМЭ (достигающую максимума 90,5%), но обработка НРР при 450 МПа (25 °С) оказалась неэффективной по снижению активности ПМЭ в соке апельсина. По мнению авторов, для сокращения времени выдержки при промышленной переработке фруктовых соков потребуется более высокое давление и/или температура. Высказано предположение, что обработка НРР при давлении до 300 МПа недостаточно для достижения максимального снижения активности фермента. ПМЭ можно охарактеризовать как устойчивый к давлению фермент, стабильный при давлении до 400 МПа. Кроме того, повышенное содержание растворимых сухих веществ в соках защищает ПМЭ от инактивации давлением и нагреванием. Можно считать это основным фактором, который способствует устойчивости к инактивации ПОД и ПМЭ при обработке давлением средних величин.

Условия обработки сильно зависят от плода и сорта, так как ферменты ПФО из разных фруктов проявляли разную устойчивость к НРР и комбинации НРР и термической обработки. Например, обработка НРР (600 МПа, 60 мин) не вызывала инактивации ПФО в груше, тогда как в яблочном и клубничном соках она приводила к инактивации ПФО на 89% и 8% соответственно [41]. Другим важным ферментом клубничного сока является β-глюкозидаза, которая связана с различными ключевыми метаболическими процессами, связанными с биоформированием аромата, такими как высвобождение 2,5-диметил-4-гидрокси-3(2H)-фуранона из его гликозидного предшественника.

В клубнике β-глюкозидаза также катализирует гидролиз арила и высвобождает фенолглюкозид, тем самым улучшая вкус соков. Хотя β-глюкозидаза показала низкую стабильность при обработке сока, она ответственна за деградацию антоцианов. Поэтому инактивация этих ферментов необходима для лучшего качества соков. Установлено, что β-глюкозидаза активировалась при 400 МПа, и ее активность увеличивалась с увеличением времени обработки, самая высокая активность (т.е. 116,7%) была отмечена через 25 мин. Однако обработка НРР при 600 МПа эффективно снижала активность β-глюкозидазы (т.е. максимальное снижение составляло 41,4%) через 25 мин. Такие же результаты, увеличение активности ПОД после комбинированной обработки НРР (200–600 МПа в течение 5 мин) и термозвука (40 кГц и 240 Вт в течение 15 минут при 25–45 °С), получены при обработке черничного сока.

#### 4. Применение технологии обработки НРР фруктового пюре и соков с мякотью

Фруктовые пюре и соки с мякотью в значительной степени подвержены потемнению и изменению вкуса из-за действия эндогенных ферментов и неферментативного потемнения [42]. Традиционно фруктовая мякоть и пюре подвергаются термической пастеризации для повышения стабильности продукта при хранении, что влияет на органолептические показатели. Ферменты ПФО сливы чрезвычайно устойчивы к давлению по сравнению с другими фруктами, поэтому ОА РРО может быть проблемой для стабильности пюре во время его промышленного производства, поэтому подтверждение промышленного применения нами не установлено. По мнению авторов исследования, высокая активность ПФО после НРР связана с высвобождением мембраносвязанных ферментов, повышающих экстрагируемость ПФО из пюре, противодействующих инактивирующему эффекту обработки НРР. Тем не менее обработка НРР сохраняет органолептические характеристики конечного продукта, при этом также и его биологически активные вещества [43]. Кроме того, некоторые ингибиторы ферментов или агенты против потемнения, такие как смесь сахара, соли, хлорида кальция, аскорбиновой кислоты и цистеина, использовались для предотвращения потемнения переработанных фруктовых продуктов. Например, добавление аскорбиновой кислоты уменьшает потемнение пюре из манго, обработанного НРР. Хотя полностью инактивировать ферменты в купажируемых соках с мякотью с помощью этих добавок против потемнения

невозможно, так как во время смешивания фруктов в матрицу попадает значительное количество кислорода, который катализирует процесс порчи. Тем не менее обработка НРР устраняет недостатки традиционной термической обработки, но имеет ограниченную эффективность для инактивации ПФО, поскольку ПФО является термо- и баррорезистентным ферментом. Комбинирование термоактивированного НРР (600 МПа в течение 5 мин при 90 °С) с лимонной кислотой (2%) полностью инактивировала ПОД в грушевом пюре, а ПФО инактивация составила только 60%. Также установлено, что синергетический эффект НРР-термического процесса обработки (200–600 МПа при 25 и 60 °С) снижал активность ПФО до 94% при 500 МПа и 25 °С в персиковом пюре [23].

В продуктах из клубники окислительные ферменты ПФО и ПОД приводили к деградации биологически активных веществ, таких как полифенолы, а антоцианы в конечном итоге вызывали изменение цвета. Было установлено, что активность ПФО и ПОД в мякоти клубники постепенно снижалась с повышением уровня давления (400–600 МПа) или увеличением времени обработки (5–25 мин) при комнатной температуре. Точно так же обработка НРР снижала активность ПОД до 35,7% после 5 мин обработки, однако через 10 мин уровень возрос до 71,9%. По мнению авторов исследования, восстановление активности ПОД может быть связано с индуцированными НРР конформационными изменениями в белках или ферментах. НРР нарушал структуру, стабильность и функциональность белка, а также внутримолекулярное взаимодействие и/или взаимодействие между функциональными группами белка и растворителем (обычно водой). Остаточная активность ПОД снизилась до 54,5–50 [44]. Ферменты более стабильны в гомогенатной форме, где они защищены такими молекулами, как белки, углеводы и пектин. В ходе исследования установлено снижение активности ПФО на 11–30% после обработки НРР (400–600 МПа в течение 1,5–3 мин) по сравнению с термообработанным клубничным пюре (т.е. снижение активности фермента на 24%) [45]. Однако активность ПФО постепенно удваивалась (в среднем 189% свежеприготовленного пюре) в течение 49 сут хранения (6 °С) за счет обратимой структурной модификации белков. Кроме того, клубничный сок, обработанный НРР, показал инактивацию ПФО после обработки и во время хранения. Но следует отметить, что активность ПФО зависит от типа и уровня эндогенных фенольных соединений, присутствия кислорода и рН матрицы.

Обработка НРР ананасового пюре (600 МПа в течение 20 мин при 70 °С) привела к снижению ПФО (92%) и ПОД (96%). Однако результаты, полученные в результате обработки только НРР (без термической обработки), показали меньшую инактивацию ПФО (45%), ПОД (47%) при 600 МПа/30 °С в течение 20 мин [46]. А вот применение комбинированной обработки НРР и термической обработки (600 МПа при 70 °С) пюре из тыквы позволило добиться большей инактивации ПФО. Следовательно, для инактивации ПФО целесообразно использовать сочетание НРР и термической обработки (690 МПа в течение 2 и 5 мин при 80 °С) [21].

Воздействие высокого давления на белки в растворе способствует структурной перестройке системы макромолекула/растворитель, что приводит к уменьшению ее объема. Проводилась оценка влияния НРР (600 МПа в течение 1 мин) и кратковременной высоко-

температурной обработки (110 °С в течение 8,6 с) на качество нектара манго. Согласно полученным результатам, ПФО и ПОД были полностью инактивированы во всех обработанных образцах, а в процессе хранения при температуре 4 и 25 °С для всех образцов активность не выявлена [47].

В последние годы было проведено несколько исследований по обработке купажированных фруктовых пюре НРР. Результаты показали, что инактивация ПМЭ носит комплексный характер и не влияет на вкус продуктов, обработанных НРР. Кроме того, ферменты ПФО и ПОД оставались полностью активными после обработки НРР (350–600 МПа в течение 3–5 мин при 10 °С), что вызывало потемнение и изменение цвета и вкуса пюреобразных продуктов [43]. Результаты некоторых проведенных исследований о влиянии обработки НРР фруктовых пюре обобщены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние НРР на ферментативный профиль фруктовых пюре, мякоти и нектара

Наименование фруктового сырья	Ферменты	Параметры НРР	Сравнение или комбинирование с другими методами обработки	Результат воздействия на ферменты	Источник
Пюре из персика ( <i>Prunus persica</i> , сорта <i>Redhaven</i> )	ПФО	200–600 МПа в течение 2–23 мин при 25–45 °С	В сочетании с ТП (50–60 °С, 2–30 мин)	Снижение ОА на 24% при 300 МПа, 66% при 400 МПа и 94% при 500 МПа по сравнению с контрольными значениями при 25 °С через 10 мин	[23]
Пюре из тыквы (сорт <i>Butternut</i> )	ПФО	300–900 МПа	В сочетании с ТП (60–80 °С в течение 1 мин)	Все виды обработки значительно снижали активность ПФО, за исключением 300 МПа / 70 °С, которые повышали активность ПФО	[21]
Пюре из банана ( <i>Musa cavendishii</i> L.)	ПФО	500 МПа в течение 10 мин	По сравнению с ТП (90 °С в течение 2 мин)	19,41 % ОА	[49]
Пюре из сливы ( <i>Prunus salicina</i> Lindl.)	ПФО	400–600 МПа в течение 1–300 с	По сравнению с ТП (85 °С в течение 5 мин)	Первоначальная активность ПФО не изменилась	[42]
Пюре из красной сливы с мякотью и кожурой (сорт <i>Crimson Globe</i> )	ПФО	300–900 МПа в течение 1 мин при 60–80 °С	По сравнению с ТП (85 °С в течение 5 мин)	87–39 % ОА	[42]
Пюре из ананаса ( <i>Ananas comosus</i> L.)	ПФО, ПМЭ и ПО	100–600 МПа, время 0–30 мин	В сочетании с ТП (20–70 °С)	Инактивацию ПФО, ПОД и ПМЭ наблюдали при 600 МПа / 60 °С / 10 мин для образцов с рН 3,0; 3,5 и 4,0 соответственно	[46]
Пюре из ананаса ( <i>Ananas comosus</i> L.)	ПФО и ПОД	0,1–600 МПа время 0–20 мин	В сочетании с ТП (30–70 °С)	ПОД: инактивация 63% и 96% при 200 МПа / 70 °С и 600 МПа / 70 °С в течение 20 мин соответственно. ПФО: инактивация 22% и 45% при 200 МПа/30 °С и 600 МПа/30 °С в течение 20 мин соответственно	[46]

Окончание табл. 2

Наименование фруктового сырья	Ферменты	Параметры НРР	Сравнение или комбинирование с другими методами обработки	Результат воздействия на ферменты	Источник
Грушевое пюре	ПФО и ПОД	600 МПа, 90 °С, 5 мин	ТП (90 °С, 7 мин) и лимонная кислота (2 %, к общ. весу)	Во время НРР + ТР + лимонная кислота, ПФО: 60 % инактивировано. ПОД: полностью инактивирован	[41]
Яблочное пюре	ПФО	600 МПа в течение 15 мин	В сочетании с ТП (62 °С)	Активируется на 94 % через 5 мин обработки. Однако ПФО показал 89% ОА при комнатной температуре и 59% ОА при 62 °С	[45] [14]
Пюре из клубники ( <i>Fragaria ananassa</i> , сорта <i>Camarosa</i> )	ПФО	600 МПа в течение 15 мин	В сочетании с ТП (62 °С)	Инактивируется с 63 % ОА через 5 мин до 8 % ОА через 60 мин. Клубника <i>Camarosa</i> ПФО показала наименьшую ОА 19% при комнатной температуре и 2% при 62 °С	[44]
Клубничное пюре ( <i>Fragaria ananassa</i> cv. <i>Festival</i> and <i>Aroma</i> )	ПОД и ПФО	100–690 МПа в течение 5–15 мин при 24–90 °С	В сочетании с ТП (25–90 °С, 5–30 мин)	ПФО: инактивация 23 % ПОД: инактивация 72 %, при 690 МПа, 90 °С	[44]
Клубничное пюре ( <i>Fragaria ananassa</i> )	ПФО	400–600 МПа в течение 1,5 или 3 мин при 20 °С	По сравнению с ТП (85 °С в течение 2 мин)	Показал 11–30% ОА, неуклонно увеличивался во время хранения. После 49 суток хранения активность составила в среднем 189%	[35] [44]
Клубничное пюре ( <i>Fragaria ananassa</i> , сорт <i>Elsanta</i> )	ПГ, ПМЭ, ПРО	200–600 МПа при 40–80 °С в течение 2,5–10 мин. 0–30% добавленного сахара		Инактивация ПФО: 50%, ПМЭ: 67%, ПГ: 80% при 600 МПа / 80 °С / 10 мин / 30% добавленного сахара	[21] [40]
Пюре из манго	ПМЭ ПФО и ПОД	400–550 МПа в течение 2–16 мин	По сравнению с ТП (34–59 °С)	ОА ПМЭ (26,9–38,6%) и ПОД (44,7–53%) в пюре при 450 МПа / 8–16 мин / 59 °С и 550 МПа / 4–16 мин / 59 °С соответственно	[30]
Пюре из манго	ПМЭ ПФО и ПОД	600 МПа 10 минут при 52 °С	По сравнению с ТП (95 °С в течение 15 мин)	ОА ПМЭ составляла 14–30% и 30–42%, ОА ПФО составила 54–69% и 27–40%, ОА ПОД 36–72% и 75–91% в конце ускоренного охлаждения и хранения	[30]
Фруктовый смузи (яблочный сок, апельсиновый сок, клубника, яблочное и банановое пюре)	ПФО, ПОД, ПМЭ	350 и 450 МПа в течение 5 мин и 600 МПа в течение 3 мин при 10 °С	По сравнению с ТП (85 °С в течение 7 мин)	Ферменты были стабильны к обработке НРР, так как ПФО показал ОА 100–101 %, ПОД – 100–91,3 %, а ПМЭ показал 2,67–1,58 (мкг <sup>-1</sup> ) ОА	[24]
Фруктовый коктейль (клубника, яблоки, сок яблочный концентрированный, апельсин и банан)	ПФО	450 МПа в течение 5 мин или 600 МПа в течение 10 мин при 20 °С	По сравнению с ТП (70–90 °С в течение ≥ 10 мин)	Снижение активности на 83 % при 600 МПа	[48]

Примечания: НРР – обработка под высоким давлением; ПГ – полигалактуроназа; ПМЭ – пектинметилэстераза; ПОД – пероксидаза; ПФО – полифенолоксидаза; ОА – остаточная активность; ТП – термическая пастеризация.

### Заключение

Ключевыми задачами по обеспечению качества и безопасности продукции являются снижение микробиологической обсемененности продукта и инактивация ферментов. Результаты научного обзора показывают, что за последние два десятилетия процесс обработки НРР различных фруктовых напитков, таких как соки, пюре, соки с мякотью и нектары, с целью инактивации эндогенных ферментов был достаточно изучен. Следует отметить, что интенсивность воздействия технологии обработки на ферментативную активность различна и зависит как от вида обрабатываемого продукта, его химического состава, так и от параметров воздействия. В целом результаты влияния технологии обработки НРР на большинство исследованных ферментов, таких как полифенолоксидаза (ПФО), пероксидаза (ПОД), пектинметилэстераза (ПМЭ) и полигалактуроназа (ПГ), во фруктовых соках и смузи существенно различаются. Более того, некоторые авторы научных исследований установили, что после обработки НРР происходит увеличение ферментативной активности. Необходимо отметить, что для повышения эффективности действия НРР использовались комбинированные методы обработки, такие как температурная обработка или внесение природных противомикробных агентов наряду с действием технологии НРР. Общим выводом можно считать, что инактивация ферментов зависит от источника ферментов, pH среды, типа и доступности субстрата, пищевой матрицы, условий температуры и давления. В условиях конкретного применения технологии обработки НРР, с целью эффективности воздействия, необходимо подбирать параметры обработки, изменение которых легкодоступно и не требует дополнительных затрат. В дальнейшем необходимо проводить дополнительные исследования по изучению подробного механизма структурной модификации, инактивации, реактивации или ингибирования ферментов деградации/созревания или потемнения, вызванных обработкой НРР. Широкое применение технологии обработки НРР эффективно не только для процесса инактивации ферментов, но и с целью снижения потребности вносить различные агенты и антиокислители, а также возможности получать качественные продукты с минимальной обработкой и высокой пищевой ценностью.

### Список литературы

1. Aadil R.M., Madni G.M., Roobab U., Ur Rahman U., Zeng X.A. Quality control in beverage production: An overview. In *Quality Control in the Beverage Industry: Volume 17: The Science of Beverages* (edited by A.M. Grumezescu & A.M. Holban). 2019. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
2. Бурак Л.Ч. Современные методы консервирования, применяемые в пищевой промышленности. Обзор. *The Scientific Heritage*. 2022. № 89 (89). С. 106–124. DOI: 10.5281/zenodo.6575888.
3. Roobab U., Aadil R.M., Madni G.M., Bekhit A.E.D. The impact of nonthermal technologies on the microbiological quality of juices: a Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2018. Vol. 17. P. 437–457.
4. Porto-Fett A.C.S., Jackson-Davis A., Kassama L.S. et al. Inactivation of shiga toxin-producing *Escherichia coli* in refrigerated and frozen meatballs using high pressure processing. *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. P. 360.
5. Taddei R., Giacometti F., Bardasi L. Effect of production process and high-pressure processing on viability of *Listeria innocua* in traditional Italian dry-cured coppa. *Italian Journal of Food Safety*. 2020. Vol. 9. P. 104–109.
6. Usaga J., Acosta Ó., Churey J.J., Padilla-Zakour O.I., Worobo R.W. Evaluation of high pressure processing (HPP) inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, *Salmonella enterica*, and *Listeria monocytogenes* in acid and acidified juices and beverages. *International Journal of Food Microbiology*. 2021. Vol. 339. P. 109034.
7. Sardão R., Amaral R.A., Alexandre E.M., Saraiva J.A., Pintado M. Effect of high-pressure processing to improve the safety and quality of an *Quercus acorn* beverage. *LWT*. 2021. Vol. 149. P. 111858.
8. Sazonova S., Gramatina I., Klava D., Galoburda R. Effect of high pressure processing on raw pork microstructure and water holding capacity. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17. P. 1452–1459.
9. Hou R., Liu Y., Li W. Effect of high pressure processing on the microstructure, myofibrillar protein oxidation, and volatile compounds of sauce lamb tripe. *International Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 16. P. 20190132.
10. Šeremet D., Karlović S., Vojvodić Cebin A., Mandura A., Ježek D., Komes D. Extraction of bioactive compounds from different types of tea by high hydrostatic pressure. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021. Vol. 45. P. e15751.
11. Agcam E., Akyıldız A., Kamat S. & Balasubramanian V.M. Bioactive compounds extraction from the black carrot pomace with assistance of high pressure processing: an optimization study. *Waste and Biomass Valorization*. 2021. Vol. 12. P. 1–19.
12. Roobab U., Khan A.W., Lorenzo J.M. A systematic review of clean-label alternatives to synthetic additives in raw and processed meat with a special emphasis on high-pressure processing (2018–2021). *Food Research International*. 2021. Vol. 150. P. 110792.
13. Zhou L., Liu W., Stockmann R., Terefe N.S. Effect of citric acid and high pressure thermal processing on enzyme activity and related quality attributes of pear purée. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018. Vol. 45. P. 196–207.
14. Marszałek K., Szczepańska J., Starzonek S. Enzyme inactivation and evaluation of physicochemical properties, sugar and phenolic profile changes in cloudy apple juices after high pressure processing, and subsequent refrigerated storage. *Journal of Food Process Engineering*. 2019. Vol. 42. P. e13034.
15. Morales-de la Peña M., Salinas-Roca B., Escobedo-Avellaneda Z., Martín-Belloso, O. Welti-Chanes J. Effect of high hydrostatic pressure and temperature on enzymatic activity and quality attributes in mango purée varieties (cv. Tommy Atkins and Manila). *Food and Bioprocess Technology*. 2018. Vol. 11. P. 1211–1221.
16. Wibowo S., Essel E.A., Man S.D. Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurisation on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2019. Vol. 54. P. 64–77.

17. Marszałek K., Woźniak Ł., Skąpska S., Mitek M. High pressure processing and thermal pasteurisation of strawberry purée: quality parameters and shelf life evaluation during cold storage. *Journal of Food Science and Technology*. 2017. Vol. 54. P. 832–841.
18. Roobab U., Shabbir M.A., Khan A.W. High-pressure treatments for better quality clean-label juices and beverages: overview and advances. *LWT*. 2021. Vol. 149. P. 111828.
19. Chen T., Li B., Shu C. Combined effect of thermosonication and high hydrostatic pressure on bioactive compounds, microbial load, and enzyme activities of blueberry juice. *Food Science and Technology International*. 2021.
20. Szczepańska J., Pinto C.A., Skąpska S., Saraiva J.A., Marszałek K. Effect of static and multi-pulsed high pressure processing on the rheological properties, microbial and physico-chemical quality, and antioxidant potential of apple juice during refrigerated storage. *LWT*. 2021. Vol. 150. P. 112038.
21. Jesus A.L.T.D., Leite T.S., Cristianini M. High isostatic pressure and thermal processing of açai fruit (*Euterpe oleracea* Martius): Effect on pulp color and inactivation of peroxidase and polyphenol oxidase. *Food Research International*. 2018. Vol. 105. P. 853–862.
22. Tan P.F., Ng S.K., Tan T.B., Chong G.H., Tan C.P. Shelf life determination of durian (*Durio zibethinus*) paste and pulp upon high-pressure processing. *Food Research*. 2019. Vol. 3. P. 221–230.
23. Bleoanca I., Neagu C., Turtoi M., Borda D. Mild-thermal and high pressure processing inactivation kinetics of polyphenol oxidase from peach purée. *Journal of Food Process Engineering*. 2018. Vol. 41. P. P. e12871.
24. Hurtado A., Picouet P., Jofré A., Guàrdia M.D., Ros J.M., Bañón S. Application of high pressure processing for obtaining “fresh-like” fruitsmoothies. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. Vol. 8. P. 2470–2482.
25. Sreedevi P., Jayachandran L.E. & Srinivasa Rao P. Application of high-pressure processing for extending the shelf life of sugarcane juice under refrigerated conditions. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2020. Vol. 44. P. e14957.
26. Ramaswamy H.S., Riahi E. High-pressure inactivation kinetics of polyphenol oxidase in apple juice. *Applied Biotechnology. Food Science and Policy*. 2003. Vol. 1. P. 189–197.
27. Del Pozo-Insfran D.D., Follo-Martinez A.D., Talcott S.T., Brenes C.H. Stability of copigmented anthocyanins and ascorbic acid in muscadine grape juice processed by high hydrostatic pressure. *Journal of Food Science*. 2017. Vol. 72. P. 247–253.
28. Juarez-Enriquez E., Salmeron-Ochoa I., Gutierrez-Mendez N., Ramaswamy H.S. Shelf life studies on apple juice pasteurised by ultrahigh hydrostatic pressure. *LWT – Food Science and Technology*. 2015. Vol. 62. P. 915–919.
29. Augusto P.E.D., Tribst A.A.L., Cristianini M. High hydrostatic pressure and high-pressure homogenization processing of fruit juices. In: *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis* (edited by G. Rajauria & B.K. Tiwari). 2018. P. 393–421. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
30. Kaushik N., Rao P.S., Mishra H.N. Comparative analysis of thermal-assisted high pressure and thermally processed mango pulp: influence of processing, packaging, and storage. *Food Science and Technology International*. 2018. Vol. 24. P. 15–34.
31. Gao G., Zhao L., Ma Y., Wang Y., Sun Z. Microorganisms and some quality of red grapefruit juice affected by high pressure processing and high temperature short time. *Food and Bioprocess Technology*. 2015. Vol. 8. P. 2096–2108.
32. Rao L., Guo X., Pang X., Tan X., Liao X., Wu J. Enzyme activity and nutritional quality of peach (*Prunus persica*) juice: effect of high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Properties*. 2014. Vol. 17. P. 1406–1417.
33. Dars A.G., Hu K., Liu Q., Abbas A., Xie B., Sun Z. Effect of thermo-sonication and ultra-high pressure on the quality and phenolic profile of mango juice. *Foods*. 2019. Vol. 8. P. 298.
34. Zhu J., Wang Y., Li X. Combined effect of ultrasound, heat, and pressure on *Escherichia coli* O157:H7, polyphenol oxidase activity, and anthocyanins in blueberry (*Vaccinium corymbosum*) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017. Vol. 37. P. 251–259.
35. Chang Y.H., Wu S.J., Chen B.Y., Huang H.W., Wang C.Y. Effect of high-pressure processing and thermal pasteurisation on overall quality parameters of white grape juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 97. P. 3166–3172.
36. Aadir R.M., Madni G.M., Roobab U., Ur Rahman U., Zeng X.A. Quality control in beverage production: An overview. In *Quality Control in the Beverage Industry: Volume 17: The Science of Beverages* (edited by A.M. Grumezescu & A.M. Holban). 2017. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
37. Hou Z., Zhang Y., Qin X., Zhao L., Wang Y., Liao X. High pressure processing for sea buckthorn juice with higher superoxide dismutase activity. *Journal of Food and Nutrition Research*. 2018. Vol. 57. P. 252–263.
38. Liu Y., Zhao X.Y., Zou L., Hu X.S. Effect of high hydrostatic pressure on overall quality parameters of watermelon juice. *Food Science and Technology International*. 2013. Vol. 19. P. 197–207.
39. Abid M., Jabbar S., Hu B. Synergistic impact of sonication and high hydrostatic pressure on microbial and enzymatic inactivation of apple juice. *LWT – Food Science and Technology*. 2014. Vol. 59. P. 70–76.
40. Vervoort L., Van Der Plancken I. & Grauwet T. Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurisation of orange juice: Part II: Impact on specific chemical and biochemical quality parameters. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2011. Vol. 12. P. 466–477.
41. Sulaiman A., Soo M.J., Yoon M.M.L., Farid M., Silva F.V.M. Modeling the polyphenoloxidase inactivation kinetics in pear, apple and strawberry purées after high pressure processing. *Journal of Food Engineering*. 2015. Vol. 147. P. 89–94.
42. Yi J., Kebede B., Kristiani K. The potential of kiwifruit purée as a clean label ingredient to stabilise high pressure pasteurised cloudy apple juice during storage. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 255. P. 197–208.
43. García-Parra J., González-Cebrino F., Delgado J., Cava R., Ramirez R. High pressure assisted thermal processing of pumpkin purée: Effect on microbial counts, color, bioactive compounds and polyphenoloxidase enzyme. *Food and Bioprocess Processing*. 2016. Vol. 98. P. 124–132.
44. Cao X., Zhang Y., Zhang F., Wang Y., Yi J., Liao X. Effects of high hydrostatic pressure on enzymes, phenolic compounds, anthocyanins, polymeric color and color of strawberry pulps. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2021. Vol. 91. P. 877–885.
45. Aaby K., Grimsbo I.H., Hovda M.B., Rode T.M. Effect of high pressure and thermal processing on shelf life and quality of strawberry purée and juice. *Food Chemistry*. 2018. Vol. 260. P. 115–123.
46. Chakraborty S., Baier D., Knorr D. & Mishra H.N. High pressure inactivation of polygalacturonase, pectinmethylesterase and polyphenoloxidase in strawberry purée mixed with sugar. *Food and Bioprocess Processing*. 2015. Vol. 95. P. 281–291.
47. Liu W., Zhang M. & Bhandari B. Nanotechnology – A shelf life extension strategy for fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020. Vol. 60. P. 1706–1721.
48. Keenan D.F., Rößle C., Gormley R., Butler F., Brunton N.P. Effect of high hydrostatic pressure and thermal processing on the nutritional quality and enzyme activity of fruit smoothies. *LWT – Food Science and Technology*. 2018. Vol. 45. P. 50–57.
49. Xu Z., Wang Y., Ren P., Ni Y., Liao X. Quality of banana purée during storage: a comparison of high pressure processing and thermal pasteurisation methods. *Food and Bioprocess Technology*. 2016. Vol. 9. P. 407–420.