

УДК 66.081.4

ББК 27.73

К-642

Кондратенко Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, ГНУ Краснодарский НИИ хранения и переработки сельскохозяйственной продукции, зав. отделом, т.: 8(918)3141349 kylad_46@mail.ru;

Кондратенко Татьяна Юрьевна, ФГОУ ВПО Кубанский государственный аграрный университет, ассистент, т.: 8(918)2473288 ktatyana-19@mail.ru.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

(рецензирована)

Цель исследования: изучение возможности комплексной оптимизации процесса извлечения пектиновых веществ из растительного сырья.

Ключевые слова: пектиновые вещества, молекулярная масса, удельная площадь поверхности, оптимизация, функциональная зависимость, комплексообразующая способность.

Kondratenko Vladimir Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor, SNI Krasnodar Scientific Research Institute of Storage and Processing of Agricultural Production, head of the department, tel.: 8(918)3141349 kylad_46@mail.ru;

Kondratenko Tatyana Yurievna, FSEI HPE Kuban State Agrarian University, assistant, tel.: 8(918)2473288 ktatyana-19@mail.ru.

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF EXTRACTION OF PECTIN SUBSTANCES FROM VEGETABLE RAW MATERIALS

(reviewed)

The objective of the research: studying of the possibility of complex optimization of the process of extraction of pectin-containing substances from vegetative raw materials.

Key words: pectin-containing substances, molecular weight, the specific area of a surface, optimization, functional dependence, complex-forming ability.

Одним из перспективных направлений развития пищевой и перерабатывающей промышленности Краснодарского края и России в целом является создание высококорентабельного производства пектиновых веществ и пектинсодержащих продуктов питания, обладающих заданным уровнем функциональных характеристик. Пектиновые вещества, как природные биополимеры углеводной природы, основные структурные звенья которых представлены остатками α -D(+)-галактуроновой кислоты, в водных системах обладают комплексообразующей способностью – способностью сорбировать катионы тяжёлых металлов и радионуклидов с образованием прочных мало- и недиссоциирующих комплексов. Такие комплексы не подвергаются биодegradации в желудочно-кишечном тракте и относительно свободно выводятся из организма человека, предотвращая интоксикацию ксенобиотиками [1, 2]. Сами пектиновые вещества являются неотъемлемой частью растительной ткани всех видов высших растений Земного шара. Несмотря на важное значение пектиновых веществ для здоровья человека, особенно на фоне непрерывного загрязнения окружающей среды ксенобиотиками техногенного происхождения, а также их широкую распространенность, в том числе и в промышленно-значимых сырьевых ресурсах сельскохозяйственного производства, промышленное производство пектиновых веществ в России к настоящему времени отсутствует в силу ряда причин, одной из которых является значительная изменчивость функциональных свойств пектиновых веществ в зависимости от ботанической принадлежности растения-производителя, его сорта, почвенных и погодных условий вегетации, агротехники возделывания, локализации той или иной ткани в составе растительного организма, степени её развития, периода уборки, продолжительности и условий хранения, а также условий извлечения самих пектиновых веществ. В то же время в мире существует огромное множество технологий пектиновых веществ и пектинсодержащих продуктов питания из различных видов растительного сырья. Большинство из них принципиально различается по способу ведения процесса и аппаратурному оформлению (от использования типового оборудования до применения специально

разработанной аппаратуры) [3, 4, 5]. Следует отметить, что ведущие мировые производители пектиновых веществ используют, как правило, эксклюзивное или модифицированное оборудование. Несмотря на кажущуюся несложность любой из этих технологий, на практике в каждой из них присутствуют элементы «ноу-хау», касающиеся как научной основы технологических приемов и параметров процесса, так и аппаратурного оформления и являющиеся интеллектуальной собственностью фирм-производителей. Некоторые особенности производства отражаются только в рекламных проспектах и отдельных публикациях.

В технологии пектинов из традиционных видов сырья одними из базовых элементов, определяющих будущие свойства получаемых пектиновых веществ, являются измельчение сырья и гидролитическое выделение пектиновых веществ из протопектинового комплекса в экстракт. Однако, как показывают исследования [6], в составе растительной клеточной стенки молекулы протопектина сшиты в достаточно прочное надмолекулярное образование, представляющее уже не просто совокупность отдельных молекул, а единый сложный целлюлозо-геммицеллюлозо-пектино-протеиновый комплекс, от которого в результате гидролизующего воздействия катионов водорода могут отщепляться большие или меньшие фрагменты, переходя в растворимое состояние. Величина и структура этих фрагментов определяется преимущественно нативной сложностью и плотностью самого комплекса, а также гидролитической активностью агента, участвующего в процессе. Чем более рыхлой является структура комплекса, тем большие по размеру фрагменты будут переходить в раствор. Если при этом активность гидролизующего агента высокая, то во внутриклеточном пространстве, а затем и экстракте, будет происходить дальнейшее гидролитическое расщепление (деградация) диспергированных фрагментов на более короткие звенья.

Однако, в случаях, когда структура всего комплекса достаточно «рыхлая» и/или гидролизующий агент недостаточно активен, образовавшиеся в результате фрагменты пектиновых молекул будут иметь молекулярную массу, а, следовательно, и физические размеры, препятствующие выходу их за пределы внутриклеточного пространства через поры и повреждения клеточных стенок, несмотря на полноценное внешнее проявление процессов деградации протопектинового комплекса, сопровождающихся размягчением обрабатываемой ткани и потерей ею исходной структуры. В результате во внешний экстракт теоретически может выйти только небольшая часть реально прогидролизированных фрагментов пектиновых веществ, отличающихся сравнительной мелкодисперсностью и меньшей практической значимостью. В связи с теоретической возможностью возникновения эффекта «скрытого гидролиза», при котором менее целесообразный с целевой точки зрения процесс даёт более визуально значимые результаты [6, 7], достаточно актуальной становится задача исследования влияния степени предварительного измельчения сырья на молекулярную массу и степень проявления комплексообразующей способности пектиновых веществ, извлекаемых при прочих равных условиях. Решение данной задачи открывает перспективы улучшения не только количественных, но и качественных показателей технологии пектиновых веществ из растительного сырья.

В качестве объекта исследований была выбрана предварительно измельчённая, высушенная и фракционированная кожура плодов мандарина (*Citrus reticulata*). Сырьё измельчали и нормировали вручную по геометрическим размерам на четыре фракции 7×7×2, 7×4×2, 7×2×2 и 7×1×2 мм. Пектиновые вещества из сырья извлекали в соответствии с базовой (классической) схемой их производства из кожуры citrusовых следующим образом: в коническую колбу ёмкостью 500 мл вносили 20 г исследуемой фракции сырья, куда затем при непрерывном перемешивании приливали 320 мл 1%-го водного раствора винной кислоты, предварительно нагретого до 90°C; смесь термостатировали при температуре 90°C и периодическом перемешивании в течение 90 минут; экстракт отделяли через плотную неворсящую бельтинговую или лавсановую ткань; остаток на фильтре отжимали на ручном винтовом прессе; образовавшийся экстракт перемешивали, охлаждали до 20°C и измеряли объём. В исходном сырье определяли суммарное содержание пектиновых веществ по [8]. В экстракте определяли рН по [9] и содержание растворимых сухих веществ по [10]. Рассчитывали удельное влагопоглощение сырья – количество влаги, поглощаемой единицей массы сырья в течение всего процесса (см³/г). Расчёт производили по следующей формуле:

$$WS_{уд} = \frac{V_k \cdot (100 - \omega_k) - V_e \cdot (100 - SS_e)}{100 \cdot m_s}, \quad (1)$$

где V_k – объём 1%-го водного раствора винной кислоты, см³; V_e – суммарный объём экстракта после обработки 1%-ным водным раствором винной кислоты, см³; ω_k – концентрация винной кислоты в экстрагенте, %; SS_e – содержание растворимых сухих веществ в экстракте после обработки 1%-ным водным раствором винной кислотой, %; m_s – масса навески исходного сырья, г.

Также рассчитывали удельный выход экстракта ($\text{см}^3/\text{г}$) – объём экстракта, образующийся из 1 г сырья после всех этапов обработки – по формуле:

$$E_{ud} = \frac{V_e \cdot 100}{m_s}. \quad (2)$$

Для выделения спиртоосаждаемой фракции пектиновых веществ суммарный экстракт приливали тонкой струйкой в ёмкость, содержащую двойной объём этилового спирта крепостью 96%об. Образовавшуюся систему, периодически помешивая, выдерживали при комнатной температуре 30 минут, после чего осадок отфильтровывали через плотную неворсящую бельтинговую или лавсановую ткань. Остаток на фильтре отжимали на ручном винтовом прессе. Образовавшуюся массу количественно переносили с фильтра в химический стакан на 50 мл, в котором её высушивали в сушильном шкафу при температуре не выше 60°C в течение 2 часов. Подсушенную массу количественно переносили в фарфоровую ступку и измельчали до порошкообразного состояния. Полученный порошок количественно переносили в химический стакан на 250 мл, в который затем приливали тройной объём 7%-го раствора HCl в 94%об. этиловом спирте. Смесь тщательно перемешивают в течение 30 мин, после чего фильтровали через обеззоленный фильтр «красная лента», а осадок количественно возвращали в химический стакан. В этот же стакан приливали четверной объём 70%об. этилового спирта. Смесь тщательно перемешивали в течение 15 минут, после чего отфильтровывали через обеззоленный фильтр «красная лента». Осадок на фильтре количественно переносили назад в стакан, где к нему приливали эквивалентный объём этилового спирта крепостью 96%об. Смесь тщательно перемешивали в течение 15 минут, после чего её разделяли на обеззоленном фильтре «красная лента». Осадок количественно переносили обратно в стакан. К осадку приливали эквивалентный объём этилового спирта крепостью 96%об. Смесь тщательно перемешивали в течение 15 минут, после чего её разделяли на обеззоленном фильтре «красная лента». Осадок на фильтре переносили в предварительно доведённый до постоянной массы и взвешенный стеклянный бюкс. Высушивали при температуре 60°C до воздушно-сухого состояния. Выход спиртоосаждаемой фракции пектиновых веществ рассчитывали по формуле:

$$PS_{sp} = \frac{(m_{bp} - m_b) \cdot 100}{m_s}, \quad (3)$$

где m_{bp} – масса бюкса с пектиновыми веществами, высушенными до воздушно-сухого состояния, г; m_b – масса пустого бюкса, г.

Как один из важных показателей потенциальной «чистоты» выделяемого пектина от сопутствующих («балластных») компонентов рассчитывали такой показатель, как доля пектина среди растворимых сухих веществ экстракта (%):

$$CL_{PS} = \frac{(m_{bp} - m_b) \cdot 10000}{SS_e \cdot V_e}. \quad (4)$$

Также рассчитывали степень извлечения пектина – долю выделенного пектина от суммарного его содержания в исходном сырье (%):

$$PS_{ud} = \frac{PS_{sp}}{\sum PS}, \quad (5)$$

где $\sum PS$ – общее содержание пектиновых веществ в исследуемой растительной ткани, %.

Средневзвешенную молекулярную массу пектиновых веществ определяли вискозиметрически, по методике, изложенной в [8].

Комплексообразующую способность пектиновых веществ определяли методом «слепого» титрования. Для этого в стакан емкостью 250 мл вносили 20 мл 0,5%-ного водного раствора пектиновых веществ, к которому приливали 50 мл стандартного 0,035н раствора уксуснокислого свинца (раствор основного уксуснокислого свинца в 1н водном растворе уксусной кислоты). Содержимое стакана с образовавшимся пектатом свинца перемешивали и переносили в мерную колбу на 250 мл, доводили до метки дистиллированной водой, перемешивали и выдерживали при комнатной температуре в течение 1 часа. Затем систему фильтровали через складчатый бумажный фильтр. Анализ остаточного свинца в фильтрате проводили комплексонометрически. Для этого 20 мл фильтрата помещали в коническую колбу на 250 мл, приливали 20 мл 0,05н водного раствора трилона Б, 15 мл стандартного раствора аммиачного буфера (рН 9,2) и 1 мл 1%-ного спиртового раствора индикатора эриохрома черного Т. Полученную систему титровали 0,05н водным раствором сульфата цинка до перехода окраски индикатора от синей к фиолетовой. Контрольный опыт проводили аналогично, но вместо фильтрата в колбу вносили 20 мл дистиллированной воды.

Массу свинца в анализируемых и контрольных растворах рассчитывали по формуле:

$$m_{Pb}^x = \frac{(N_2 \cdot V_2 - N_1 \cdot V_1) \cdot 103,6 \cdot 250 \cdot 1000}{20 \cdot 1000}, \quad (6)$$

где N_1 – нормальность стандартного водного раствора Zn_2SO_4 , пошедшего на титрование избытка трилона Б, моль-эквивалент/л; V_1 – объем стандартного водного раствора Zn_2SO_4 , пошедшего на титрование избытка трилона Б, мл; N_2 – нормальность стандартного водного раствора трилона Б, добавленного к свинецсодержащему раствору, моль-эквивалент/л; V_2 – объем стандартного водного раствора трилона Б, добавленного к свинецсодержащему раствору, мл.

Комплексообразующую способность пектина (мг Pb^{2+} /г) рассчитывали по формуле:

$$КС = \frac{m_{Pb}^k - m_{Pb}^a}{m_s}, \quad (7)$$

где m_{Pb}^k – масса свинца в контрольном растворе, мг; m_{Pb}^a – масса свинца в анализируемом растворе, мг; m_s – масса навески исследуемого пектина, взятая для анализа, г.

Все исследования проводили в пятикратной повторности, с отсеиванием статистически ненадёжных результатов и определением погрешностей [11].

По предварительным предположениям немаловажную роль в технологических характеристиках сырья как источника пектиновых веществ играет степень развитости удельной площади поверхности частиц сырья. При этом не последнюю роль играет геометрия каждой отдельно взятой частицы.

В соответствии с размерами каждая из данных фракций имеет различную площадь поверхности. При этом, предполагая форму частиц, близкую к параллелепипеду, площадь поверхности отдельно взятой частицы (выраженная в $см^2$) составляет:

$$S = \frac{2 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c)}{100}, \quad (8)$$

где a – длина частицы, мм; b – ширина частицы, мм; c – высота частицы, мм.

Объём одной такой частицы (в $см^3$) составляет:

$$V = \frac{a \cdot b \cdot c}{1000}. \quad (9)$$

Масса отдельной частицы (в г) составляет:

$$m = V \cdot \rho, \quad (10)$$

где ρ – плотность материала частицы, $г/см^3$.

Следовательно, в 1 г исследуемого материала содержится некоторое количество частиц, равное:

$$n = m^{-1}. \quad (11)$$

Зная площадь поверхности отдельно взятой частицы и совокупное количество частиц, приходящееся на 1 г сырья, нетрудно определить удельную площадь поверхности – суммарную площадь поверхности частиц, приходящуюся на 1 г материала:

$$\sum S = S \cdot n = \frac{20 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c)}{\rho \cdot a \cdot b \cdot c}. \quad (12)$$

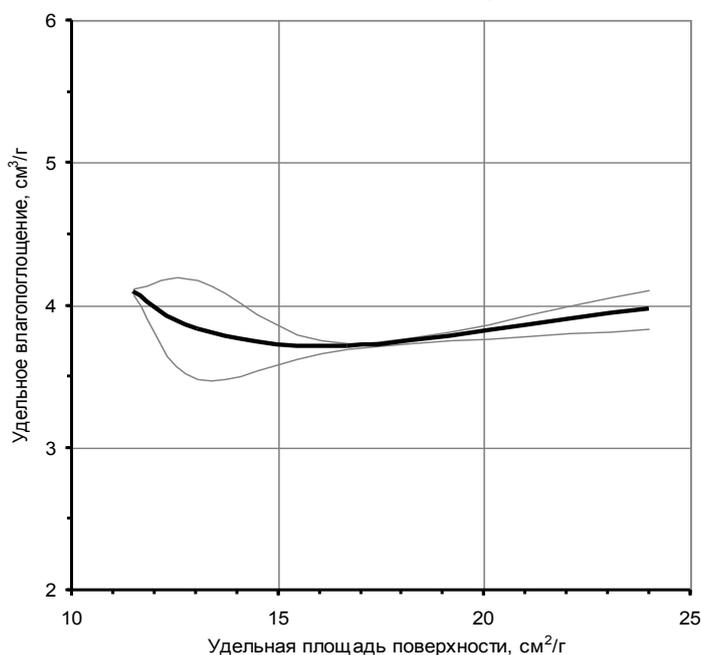


Рис. 1. Влияние удельной площади поверхности на удельное влагопоглощение

С изменением удельной площади поверхности материала теоретически должны изменяться и отдельные технологические характеристики сырья, в том числе и в отношении с жидкостной составляющей, образующейся в результате гидролиза-экстрагирования.

Анализ результатов исследований (рисунок 1) показывает наличие малозначительных изменений удельного влагопоглощения исследуемого материала (границы доверительных интервалов представлены тонкими линиями) при изменении удельной площади поверхности частиц. Небольшой прогиб кривой позволяет предположить, что в области определения значений удельной площади поверхности механизм влагопоглощения существенно не изменился – так при увеличении площади поверхности (то есть уменьшении геометрических размеров каждой отдельно взятой частицы) капиллярные силы влагосорбции внутренних капилляров частиц заменяются на аналогичные силы, но уже капилляров, образованных межчастичным пространством при достаточно малом размере частиц. Переход от одной формы влагосорбции к другой и сопровождается перегибом.

Следовательно, интенсивность удельного влагопоглощения сырья в фазе насыщения не является характеристически значимым технологическим показателем, и в том виде, в котором рассматривается, не может служить основой для осуществления оптимизации процесса извлечения пектина из растительной ткани.

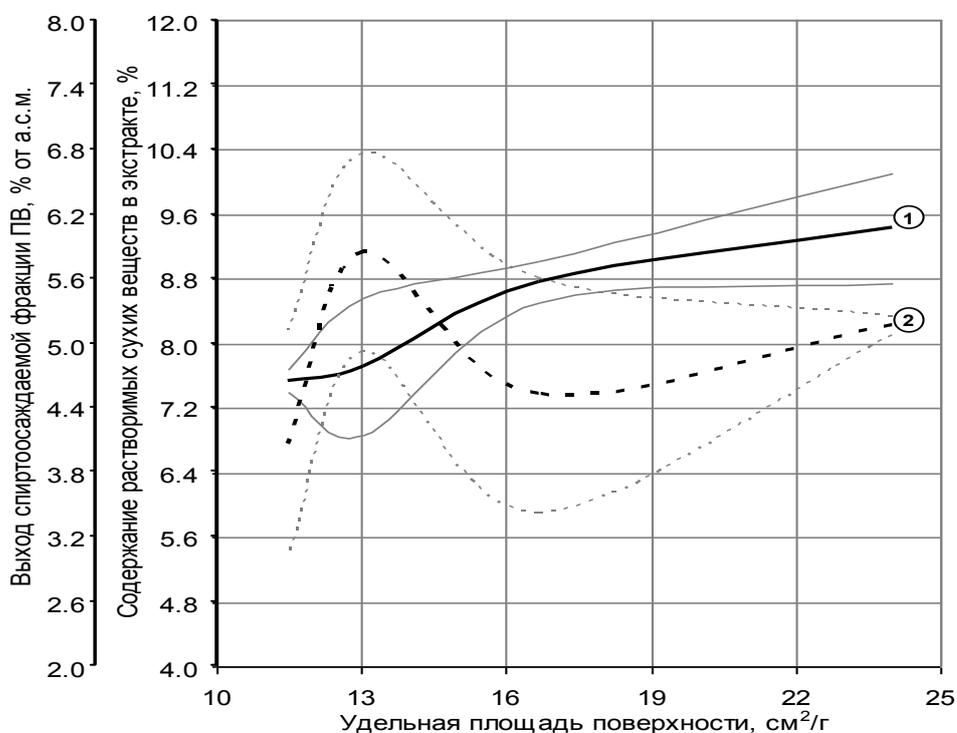


Рис. 2. Влияние удельной площади поверхности на содержание в экстракте растворимых сухих веществ (1) и выход спиртосажаемой фракции пектиновых веществ (ПВ) (2)

В процессе гидролитического воздействия на растительную ткань конечными продуктами процесса является масса отработанного сырья и некоторое количество пектинсодержащего экстракта. Поскольку на данном этапе технологического процесса целевой интерес представляет именно экстракт, следовательно, его технологические показатели и их зависимости от удельной площади поверхности представляют значительный интерес в рамках перспективы оптимизации процесса извлечения пектиновых веществ.

Основными технологическими показателями пектинсодержащего экстракта являются: содержание растворимых сухих веществ в экстракте, выход спиртосажаемой фракции пектиновых веществ, рН экстракта, а также средневзвешенная молекулярная масса пектина, диффундирующего в экстракт.

Динамика содержания растворимых сухих веществ (рисунок 2, границы доверительных интервалов представлены тонкими линиями, по типу совпадающими с типами линий, обозначающих каждый анализируемый показатель) в экстракте показывает монотонное, но слабозначимое возрастание, что опять указывает на дуализм антагонизирующих факторов, определяющих

интенсивность процесса – увеличение совокупной площади контакта фаз способствует увеличению скорости диффузии растворимых компонентов из твёрдой фазы в раствор; с другой стороны сопутствующее уменьшение геометрических размеров частиц провоцирует сокращение расстояния между ними, что, при наличии у формирующегося многокомпонентного раствора даже малой вязкости, приводит к уменьшению скорости диффузии. Это косвенно подтверждается динамикой выхода спиртоосаждаемой фракции пектиновых веществ при увеличении удельной площади поверхности. Данный показатель монотонно возрастает, за исключением пика в районе значения удельной площади поверхности $13 \text{ см}^2/\text{г}$. Формирование такого пика, вероятно, связано с неравномерностью распределения плотности по профилю частиц, но подлежит дальнейшим детальным исследованиям.

Увеличение же концентрации пектиновых веществ в растворе при увеличении удельной площади поверхности становится фактором, определяющим увеличение вязкости, что логично увязывается со значительной пологостью кривой содержания растворимых сухих веществ в экстракте.

Анализ экспериментальных данных показывает нелинейность поведения исходного материала в отношении pH экстракта в зависимости от удельной площади поверхности частиц (рисунок 3). Так pH экстракта обнаруживает монотонное убывание кислотности (увеличение численного значения) с увеличением удельной площади поверхности, начиная с $13 \text{ см}^2/\text{г}$, при меньшей удельной площади поверхности кислотность стабилизируется. Данное явление хорошо коррелирует с динамикой содержания растворимых сухих веществ, рассмотренной выше. При этом механизм данного процесса, вероятнее всего, связан с большей интенсивностью взаимодействия гидролизующего агента с солевыми мостиками, связывающими пектиновые вещества с остальными элементами матрикса клеточных стенок сырья, при увеличении поверхности контакта фаз, что способствует частичной нейтрализации кислотности. Причина же малой интенсивности возрастания численного значения pH экстракта, на наш взгляд, кроется в тех же процессах, которые препятствуют резкому увеличению накопления растворимых сухих веществ в экстракте при увеличении удельной поверхности раздела фаз.

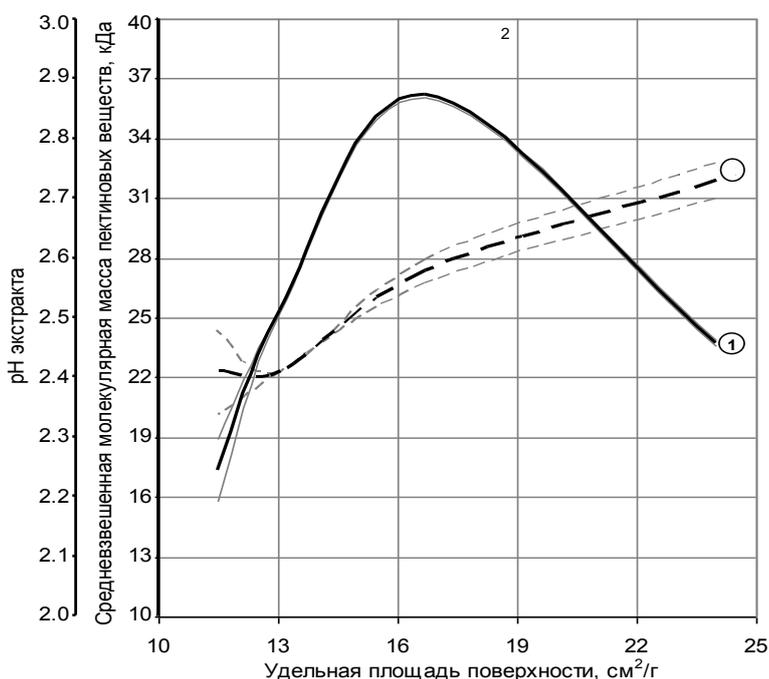


Рис. 3. Влияние удельной площади поверхности на средневзвешенную молекулярную массу пектиновых веществ (1) и pH экстракта (2)

Анализ результатов исследований влияния удельной площади поверхности на средневзвешенную молекулярную массу пектиновых веществ показывает, что данный показатель значимо зависит от степени развитости суммарной площади поверхности частиц сырья и увеличивается с увеличением удельной площади поверхности. Но данная зависимость существует только в интервале от $11,5$ до $16,5 \text{ см}^2/\text{г}$. При дальнейшем увеличении удельной площади поверхности, наоборот, происходит уменьшение молекулярной массы.

Причиной этому являются неоднородности молекулярно-массового распределения в массе пектиновых веществ, при которых сами пектиновые вещества представляет собою совокупность полимерных фрагментов с различной молекулярной массой, долевой состав которой зависит от условий извлечения. Поскольку в проведённых исследованиях основным изменяемым условием было изменение удельной площади поверхности, следовательно, именно данное условие и было определяющим. При этом увеличение удельной площади поверхности до некоторого критического значения, обеспечивая большую площадь контакта внешних слоёв пектиносодержащего сырья с экстрагентом, создаёт условия для относительно лёгкой диффузии образующихся в этих слоях в результате кислотно-термического гидролитического воздействия высокомолекулярных фракций пектиновых веществ в силу сравнительно малого диффузионного сопротивления, в то время как подобные фракции, образующиеся в более глубоких слоях частиц сырья, в силу резко возрастающего диффузионного сопротивления со стороны растительной ткани, практически лишаются возможности кроссканевой диффузии, в результате чего в экстракт диффундируют наиболее низкомолекулярные фрагменты.

Однако при достижении удельной площади поверхности определённого максимального значения в работу вступают капиллярные силы, значимость которых увеличивается с дальнейшим увеличением удельной площади поверхности, поскольку в данном случае критически уменьшается межчастичное расстояние, которое, в свою очередь, начинает приобретать всё более выраженные свойства капилляров. В этих условиях, с увеличением капиллярных сил, также начинают формироваться внешние по отношению

к молекулам пектиновых веществ диффузионные сопротивления, что приводит, в конечном счёте, к уменьшению способности самых высокомолекулярных фрагментов к диффузии из материала в экстракт.

При создании эффективного целевого пектинового производства одним из наиболее важных этапов является оптимизация соответствующих технологических режимов с учётом направленности не только на количественную, но и на качественную составляющую конечного продукта.

В соответствии с этим в качестве основного критерия оптимизации процесса извлечения пектиновых веществ, ориентированного на максимальное значение комплексобразующей способности, был выбран совокупный показатель, включающий в себя степень извлечения пектиновых веществ из растительного сырья, показывающий эффективность использования нативного пектинового потенциала сырья, комплексобразующую способность выделяемых пектиновых веществ, а также долю балластных по отношению к пектиновым веществам компонентов BSPS (%), входящих в состав растворимых сухих веществ экстракта.

Последний показатель в явной форме определяют по формуле:

$$BS_{PS} = 100 - CL_{PS} \cdot \quad (13)$$

Для адекватного расчета значений данного комплексного критерия предварительно кодировали входящие в него показатели для перевода их в безразмерную форму с одинаковым масштабом. Кодирование осуществляли, используя границы интервалов варьирования действительных значений факторов, задействованных в составе критерия, округлённые до приемлемых (с точки зрения удобства использования) значений:

$$X_i = \frac{100 \cdot (x_i - x_i^{\min})}{x_i^{\max} - x_i^{\min}}, \quad (14)$$

где X_i – кодированное значение i -го фактора; x_i – действительное значение i -го фактора; x_i^{\min} – минимальная граница интервала варьирования действительных значений i -го фактора; x_i^{\max} – максимальная граница интервала варьирования действительных значений i -го фактора.

В этом случае формула расчета критерия оптимальности имеет следующий вид:

$$k = \frac{PS_{ud}^k \cdot KC^k}{BS_{PS}^k}, \quad (15)$$

где PS_{ud}^k – кодированное значение степени извлечения пектиновых веществ, с интервалом варьирования [60; 90] %; KC^k – кодированное значение комплексобразующей способности пектиновых веществ, с интервалом варьирования [100; 900] мг Pb²⁺/г; BS_{PS}^k – кодированное значение доли балластных веществ в растворимых сухих веществах экстракта, с интервалом варьирования [10; 45] %.

Оптимизацию осуществляли графическим способом. Для этого значения основных и сопутствующих характеристик системы, а также значения критерия оптимальности наносили на координатную матрицу в масштабах, обозначенных границами соответствующих интервалов варьирования. Интерполяцию между экспериментальными точками осуществляли методом

кубических сплайнов. Общий вид совокупного графика оптимизации процесса представлен на рисунке 4.

Оптимизацию процесса осуществляли по зоне локального максимума значений критерия оптимальности в зоне варьирования значений удельной площади поверхности частиц. Выбирали диапазон значений удельной площади поверхности, соответствующих данному максимуму, включая боковые пологие участки плеч графика критерия оптимальности в зоне максимума. Далее для выбранного интервала оптимальных значений удельной площади поверхности частиц определяли качественные и количественные характеристики процесса по участкам соответствующих кривых, пересекаемых диапазоном интервала оптимальных значений.

В результате такого подхода было определено, что для извлечения пектина из цитрусового сырья оптимальным является диапазон значений удельной площади поверхности частиц [12,85; 13,20] $\text{см}^2/\text{г}$. Используя в технологическом процессе предварительно высушенное цитрусовое сырьё, измельчённое до размеров, соответствующих удельной площади частиц из этого диапазона, возможно гарантированно достигать следующих значений показателей процесса и конечного продукта: удельный выход экстракта [4,42; 4,45] $\text{см}^3/\text{г}$; pH экстракта [2,41; 2,42]; содержание растворимых сухих веществ в экстракте [7,66; 7,75] %; степень извлечения пектиновых веществ из исходного сырья [88,0; 88,5] %; средневзвешенная молекулярная масса пектиновых веществ [24,6; 26,0] кДа; комплексообразующая способность пектиновых веществ [700; 748] $\text{мг Pb}^{2+}/\text{г}$.

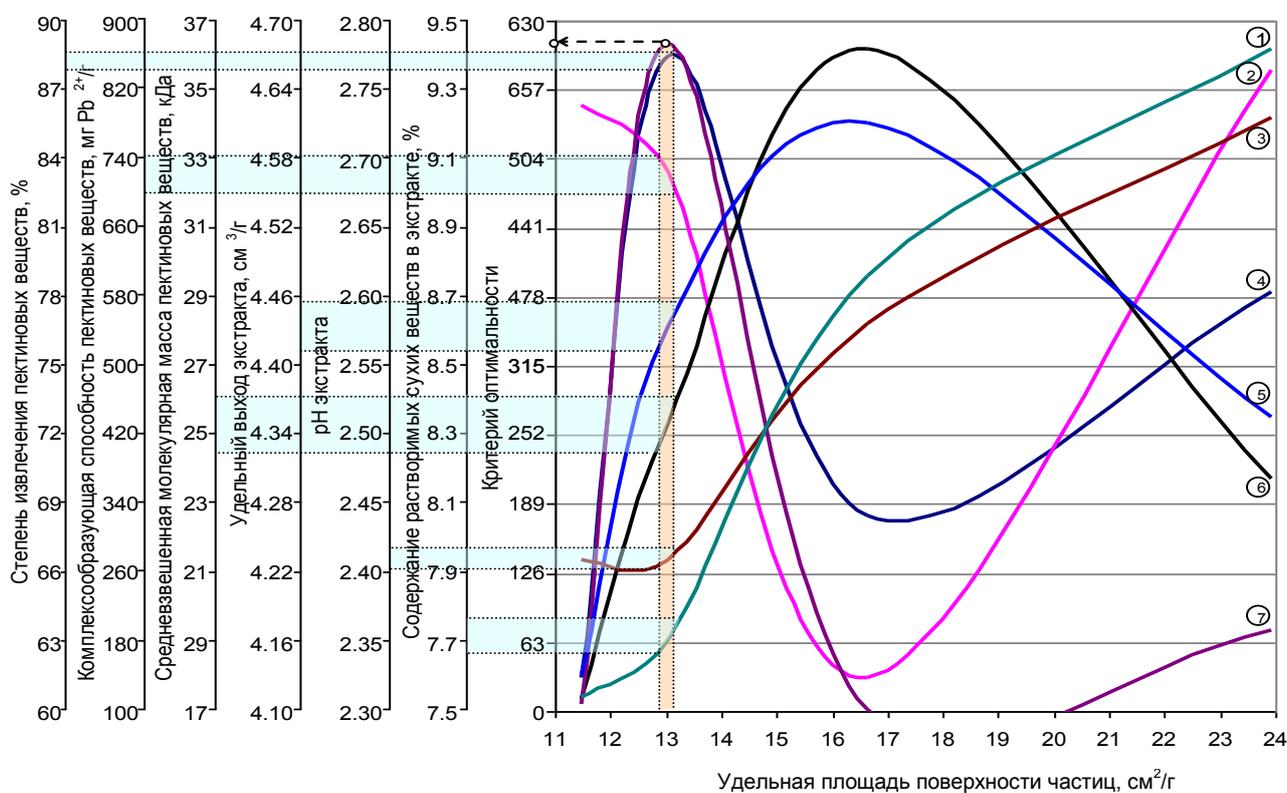


Рис. 4. Графическая критериальная оптимизация процесса извлечения пектиновых веществ из цитрусового сырья:

1 – содержание растворимых сухих веществ в экстракте, %; 2 – комплексообразующая способность пектиновых веществ, $\text{мг Pb}^{2+}/\text{г}$; 3 – pH экстракта; 4 – степень извлечения пектиновых веществ из растительной ткани, %; 5 – удельный выход экстракта, $\text{см}^3/\text{г}$; 6 – средневзвешенная молекулярная масса пектиновых веществ, кДа; 7 – критерий оптимальности

Экспериментальные исследования указанных характеристик процесса в точках оптимальности показали адекватность использованного подхода.

В результате, нормируя удельную площадь поверхности обрабатываемого материала, можно добиться значительной оптимизации технологического процесса, основанного на диффузии. На практике же выводы, сделанные на основании анализа массива экспериментальных данных, можно применить для расчета заданной геометрической формы частиц.

Например, при известном оптимальном значении удельной площади поверхности частиц WS_{ud}^{opt} (см²/г), известной плотности материала частиц ρ (г/см³) и известной форме частиц (например, цилиндрической, что удобно при экструдировании материала), задаваясь известным диаметром частицы (диаметром круглого основания) – D (мм), – нетрудно рассчитать высоту цилиндра (h , мм):

$$h = \frac{20 \cdot D}{WS_{ud}^{opt} \cdot \rho \cdot D - 40}, \quad (16)$$

причём для данного материала разрешёнными являются значения диаметра, соответствующие формуле:

$$D > \frac{40}{WS_{ud}^{opt} \cdot \rho}. \quad (17)$$

Такой пересчёт достаточно легко осуществить практически для любой реальной формы частиц сырья, получаемых при первичной или глубокой переработке, что позволяет использовать результаты подобной оптимизации для широкого спектра различных сырьевых источников, имеющих наибольшую значимость в любом отдельно взятом регионе Российской Федерации.

Литература:

1. Thakur B., Slugh R., Handa A. Chemistry and Uses of Pectin: a Review // J. Crit. Rev. Food Sci. 1997. V. 37. P. 47-73.
2. Kohn R. Ion Binding on Polyuronates – Alginate and Pectin // J. Pure App. Chem. IUPAC. 1975. V. 42. Issue 3. P. 371-397.
3. Urias-Orona V. A Novel Pectin Material: Extraction, Characterization and Gelling Properties // Int. J. Mol. Sci. 2010. V. 11. P. 3686-3695.
4. Ефремов А.А., Кондратюк Т.А. Выделение пектина из нетрадиционного растительного сырья и применение его в кондитерском производстве // Химия растительного сырья. 2008. №4. С. 171-176.
5. Донченко Л.В., Фирсов Г.Г. Пектин: основные свойства, производство и применение. М.: ДеЛи принт, 2007. 207 с.
6. Кондратенко В.В., Кондратенко Т.Ю., Чубит Л.Ю. Теоретические аспекты извлечения пектиновых веществ из растительной ткани // Совершенствование технологий и оборудования пищевых производств: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. Минск: НПЦ НАН Беларуси по продовольствию, 2007. Ч. 1. С. 121-126.
7. Кондратенко В.В., Кондратенко Т.Ю., Чубит Л.Ю. Влияние вида гидролизующего агента на процесс гидролиза-экстрагирования пектина из различных сортов тыквы // Современные проблемы технологии, производства, хранения, переработки и экспертизы качества сельскохозяйственной продукции: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Мичуринск: МичГАУ, 2007. Т. 1. С. 303-308.
8. Пектин. Методы контроля в пектиновом производстве / Нелина В.В. [и др.]. Киев, 1992. 105 с.
9. ГОСТ 26188-84. Продукты переработки плодов и овощей, консервы мясные и мясорастительные. Метод определения рН. Взамен ГОСТ 8756.16-70; введ. 1985-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1984. 6 с.
10. ГОСТ 28562-90. Продукты переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ. Взамен ГОСТ 8756.2-70; введ. 1991-07-01. М.: Стандартиформ, 2005. 10 с.
11. Муха В.С. Статистические методы обработки данных: учеб. пособие. Минск: Изд. центр БГУ, 2009. 183 с.

References:

1. Thakur B., Slugh R., Handa A. Chemistry and Uses of Pectin: a Review // J. Crit. Rev. Food Sci. 1997. V.37. P.47-73.
2. Kohn R. Ion Binding on Polyuronates - Alginate and Pectin // J. Pure App. Chem. IUPAC. 1975. V. 42. Issue 3. P.371-397.
3. Urias-Orona V. A Novel Pectin Material: Extraction, Characterization and Gelling Properties // Int. J. Mol. Sci. 2010. V.11. P.3686-3695.
4. Efremov A. A., Kondratyuk T. A. Isolation of pectin from plant material and non-traditional use of it in the confectionery industry // Chemistry of plant raw materials. 2008. № 4. P.171-176.
5. Donchenko L.V., Firsov G.G. Pectin: basic properties, production and use. M. DeLee print, 2007. 207 p.
6. Kondratenko V.V., Kondratenko T.Y., Chubit L.Y. Theoretical aspects of extracting pectin from plant tissues // Advances in technology and equipment of food production: Proceedings of Intern. Scientific-Practical. Conf. Minsk: SPC for Food, 2007. Part 1. P.121-126.

7. Kondratenko V. V., Kondratenko T. Y., Chubit L.Y. *Effect of hydrolyzing agent to form a process of hydrolysis-extraction of pectin from different varieties of pumpkins // Modern problems of technology, production, storage, processing and quality assessment of agricultural production: Materials Intern. Scientific-Practical. Conf. Michurinsk: MichGAU, 2007. V.1. P.303-308.*
8. *Pectin. Control methods in the production of pectin / Nelina V. V.[And others]. Kiev, 1992. 105p.*
9. *GOST 26188-84. Products of processing of fruits and vegetables, canned meat and vegetation. Method for determination of pH. GOST 8756.16-70 Instead, enter. 07/01/1985. Moscow: Standards Press, 1984. 6c.*
10. *GOST 28562-90. Products of processing of fruits and vegetables. The refractometric method for determining the soluble solids. Instead of GOST 8756.2-70, enter. 07/01/1991. M. Standartinform, 2005. 10p.*
11. *Mukha V.S. Statistical methods for data processing: Textbook. Minsk: pub. center BSU 2009. 183p.*