

УДК 664.292

ББК 36.84

X-25

Хатко Зурет Нурбиевна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой технологии пищевых продуктов и организации питания факультета аграрных технологий ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191;

Ашинова Анжелика Александровна, аспирант кафедры технологии пищевых продуктов и организации питания факультета аграрных технологий ФГБОУ ВО «Майкопский государственный технологический университет»; 385000, г. Майкоп, ул. Первомайская, 191

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСООБРАЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПЕКТИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ КОМБИНАЦИЙ

(рецензирована)

Статья посвящена получению и исследованию математических моделей комплексообразования различных видов пектиновых веществ и их комбинаций. Установлена зависимость комплексообразования различных видов пектиновых веществ и их комбинаций от массовой доли пектиновых веществ, pH среды и продолжительности гидролиза экстрагирования.

Ключевые слова: *пектиновые вещества, комплексообразующая способность, математическая модель, трехфакторный эксперимент, продолжительность связывания металл-пектин, pH среды, математическое планирование Бокса-Бенкина.*

Khatko Zuret Nurbievna, Doctor of Technical sciences, an associate professor, head of the Department of Food Technology and Catering, Faculty of Agrarian Technologies, Maikop State Technological University; 385000, Maikop, 191 Pervomayskaya St.;

Ashinova Anzhelika Alexandrovna, a post-graduate student of the Department of Food Technology and Catering, Faculty of Agrarian Technologies, Maikop State Technological University; 385000, Maikop, 191 Pervomayskaya St.;

MATHEMATICAL MODELS OF COMPLEX FORMATION OF DIFFERENT TYPES OF PECTIN SUBSTANCES AND THEIR COMBINATIONS

(reviewed)

The article is devoted to obtaining and studying mathematical models of the complexation of various types of pectic substances and their combinations. The dependence of complexation of various types of pectic substances and their combinations on the mass fraction of pectic substances, pH of the medium and the duration of the hydrolysis of extraction has been stated.

Keywords: *pectin substances, complex-forming ability, mathematical model, three-factor experiment, duration of metal-pectin binding, pH of the medium, Box-Benkin mathematical planning.*

В настоящее время большое внимание уделяется безопасности пищевой продукции. Среди основных характеристик безопасности пищевой продукции значится отсутствие в ней радионуклидов и тяжелых металлов, которые могут попадать в нее в процессе производства, хранения и переработки. При выборе защиты от вредного воздействия радионуклидов и тяжелых металлов предпочтение должно отдаваться веществам природного происхождения, которые могут применяться постоянно, не оказывая вредного воздействия.

В качестве природных веществ, обладающих защитным для организма человека действием, актуальны пектиновые вещества благодаря их широкому спектру профилактического и лечебного действия. **Так, комплексобразующая (связывающая) способность пектиновых веществ обеспечивает связывание и выведение из организма тяжелых металлов [2, 4, 5, 6].** Эти свойства пектиновых веществ зависят от содержания свободных карбоксильных групп, рН среды и других факторов, не зависит от молекулярной массы и определяется коэффициентом селективности катионного обмена, являющейся характеристикой насыщения пектинов двухвалентным катионом.

В связи с этим представляет интерес получение и исследование математических моделей комплексообразования пектиновых веществ для целенаправленного использования их в различных отраслях народного хозяйства.

Цель работы – получение и исследование математических моделей комплексообразования различных видов низкоэтерифицированных пектиновых веществ и их комбинаций в зависимости от массовой доли пектиновых веществ, значения рН среды, продолжительности связывания «металл (Pb^{2+})-пектин».

В качестве объектов исследования использовали яблочный модифицированный (Я), цитрусовый модифицированный (Ц) и свекловичный (С) пектины, и их комбинации (ЯЦ, ЯС, ЦС). Характеристика пектиновых веществ представлена в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика исследуемых пектиновых веществ

Наименование пектина	Производитель	Степень этерификации, %	рН 1% раствора
Яблочный	«Айдиго», Китай	45...49	3,2...4,0
Цитрусовый	«Danisko», Чешская Республика	46...50	3,4...4,0
Свекловичный	Лабораторный, соответствующий ОСТ 18-62-72	30...45	3,7...4,0

Исследование связующей способности пектиновых веществ определяли по модифицированной методике прямого титрования [3]. Математическое моделирование исследуемых объектов выполнено с помощью плана Бокса-Бенкина, обработка результатов – программы «Statistica 10.0» [1].

С целью определения факторов, влияющих на связующую способность различных видов пектиновых веществ и их комбинаций был поставлен трехфакторный эксперимент с использованием симметричного некомпозиционного плана Бокса-Бенкина.

В ходе исследования изучали влияние следующих факторов: X1 – массовая доля пектиновых веществ; X2 – значение рН среды; X3 – продолжительность связывания

«металл-пектин». В качестве зависимой переменной Y выбрана массовая доля связанного пектиновыми веществами металла (комплексобразующая способность): для яблочного пектина – Y_1 , цитрусового пектина – Y_2 , свекловичного пектина – Y_3 , комбинации ЯЦ – Y_4 , ЯС – Y_5 , ЦС – Y_6 . Матрица планирования эксперимента и полученные результаты приведены в таблице 2, уровни варьирования исследуемых факторов – в таблице 3.

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

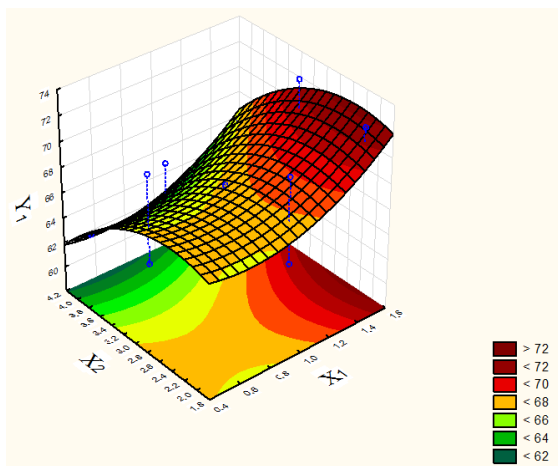
№ опыта	Фактор			Зависимая переменная					
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	-1	-1	0	62,81	58,31	83,13	75,85	88,90	76,41
2	1	-1	0	66,29	60,67	84,36	77,69	90,94	77,92
3	-1	1	0	66,49	61,06	84,94	78,76	91,46	79,03
4	1	1	0	72,26	66,47	87,97	83,50	96,10	83,64
5	-1	0	-1	63,84	58,98	82,42	77,81	88,73	76,30
6	1	0	-1	68,16	64,94	84,46	80,69	92,42	79,51
7	-1	0	1	70,76	65,26	86,52	82,88	93,11	82,66
8	1	0	1	72,94	66,43	87,71	84,12	95,84	83,83
9	0	-1	-1	61,74	56,89	81,31	75,54	86,69	73,71
10	0	1	-1	64,46	59,69	82,62	78,26	89,16	76,58
11	0	-1	1	65,76	59,43	84,01	78,02	89,57	77,57
12	0	1	1	71,09	64,48	86,97	82,68	93,88	82,54
13	0	0	0	67,29	62,03	84,17	78,76	90,18	78,39
14	0	0	0	67,28	61,93	84,14	78,73	90,10	78,32
15	0	0	0	67,31	61,91	84,12	78,67	90,13	78,29

Таблица 3. Уровни варьирования факторов

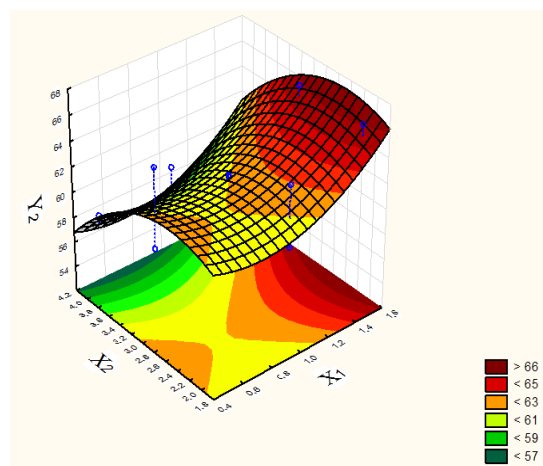
Наименование фактора	Ед. изм.	Обозначение	Уровни варьирования факторов		
			верхний	нулевой	нижний
			+1	0	-1
Массовая доля ПВ	%	X_1	1,5	1	0,5
Значение рН среды	($-\lg [H^+]$)	X_2	4	3	2
Продолжительность связывания металл-пектин	мин.	X_3	60	40	20

Уровни варьирования факторов определялись в соответствии с аналитическим обзором.

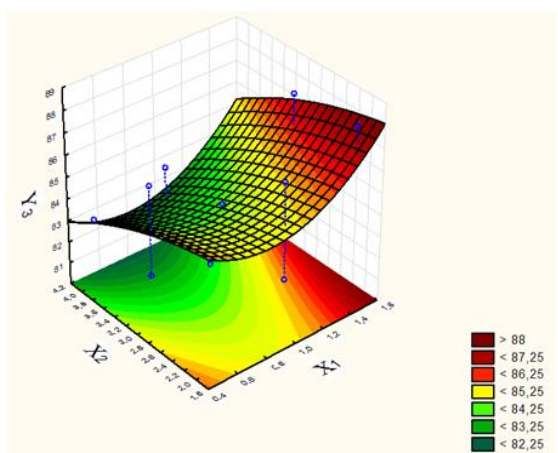
Полученные графические зависимости, показывающие влияние массовой доли пектиновых веществ, рН среды, время связывания «металл-пектин», представлены на рисунке 1.



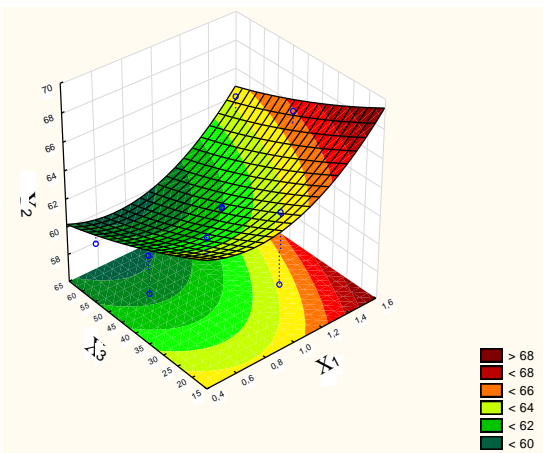
а



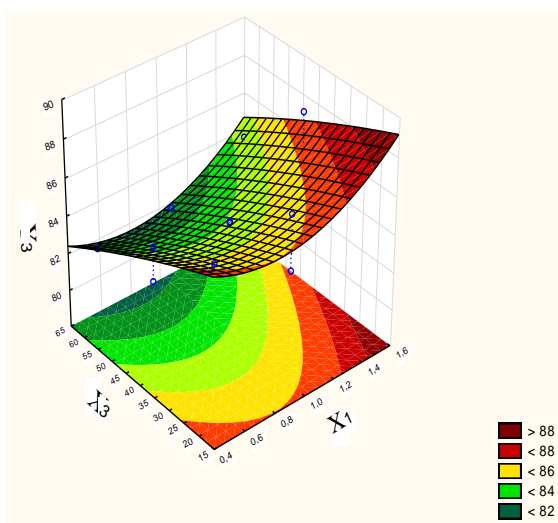
б



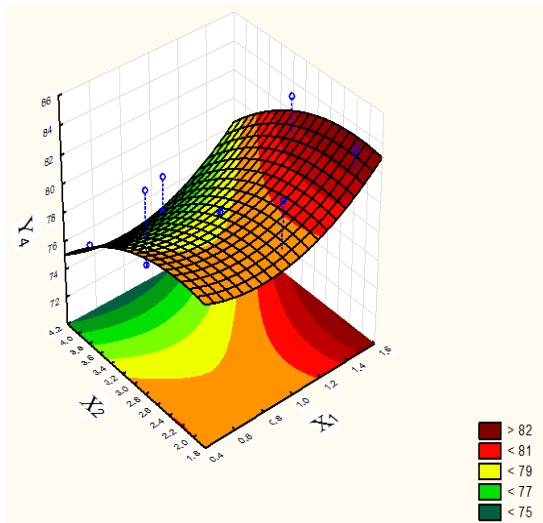
в



г



д



е

Рис. 1. График зависимости комплексобразующей способности различных видов пектиновых веществ и их комбинаций: а – Я; б – Ц; в – С; г – ЯЦ; д – ЯС; е – ЦС

$$Y_1 = 66,3791 - 7,3847 \cdot X_1 + 5,6611 \cdot X_1^2 + 8,2708 \cdot X_2 - 1,7472 \cdot X_2^2 - 0,1827 \cdot X_3 + 0,0005 \cdot X_3^2; (1)$$

$$Y_2 = 57,4503 - 10,0483 \cdot X_1 + 6,8867 \cdot X_1^2 + 10,2709 \cdot X_2 - 2,0533 \cdot X_2^2 - 0,1387 \cdot X_3 + 0,0006 \cdot X_3^2; (2)$$

$$Y_3 = 91,3625 - 8,1516 \cdot X_1 + 5,0133 \cdot X_1^2 + 0,5675 \cdot X_2 - 0,2966 \cdot X_2^2 - 0,0656 \cdot X_3 + 0,0003 \cdot X_3^2; (3)$$

$$Y_4 = 85,2125 - 9,2450 \cdot X_1 + 5,9600 \cdot X_1^2 + 0,5475 \cdot X_2 - 1,2600 \cdot X_2^2 - 0,3292 \cdot X_3 + 0,0029 \cdot X_3^2; (4)$$

$$Y_5 = 101,2621 - 14,3783 \cdot X_1 + 8,8267 \cdot X_1^2 + 1,1475 \cdot X_2 - 0,4933 \cdot X_2^2 - 0,1326 \cdot X_3 + 0,0005 \cdot X_3^2; (5)$$

$$Y_6 = 86,6125 - 12,9413 \cdot X_1 + 7,7833 \cdot X_1^2 + 4,1500 \cdot X_2 - 1,0292 \cdot X_2^2 - 0,1873 \cdot X_3 + 0,0007 \cdot X_3^2; (6)$$

Значимость коэффициентов уравнений регрессии подтверждена результатами дисперсионного анализа. Коэффициенты детерминации для уравнений 1-6 соответственно равны $R^2_1=0,964$, $R^2_2=0,925$, $R^2_3=0,962$, $R^2_4=0,951$, $R^2_5=0,971$, $R^2_6=0,958$, что свидетельствует об адекватности полученных математических моделей.

Установлено, что при разных факторах эксперимента изменяется комплексообразующая способность различных видов пектиновых веществ и их комбинаций (рисунок 2).

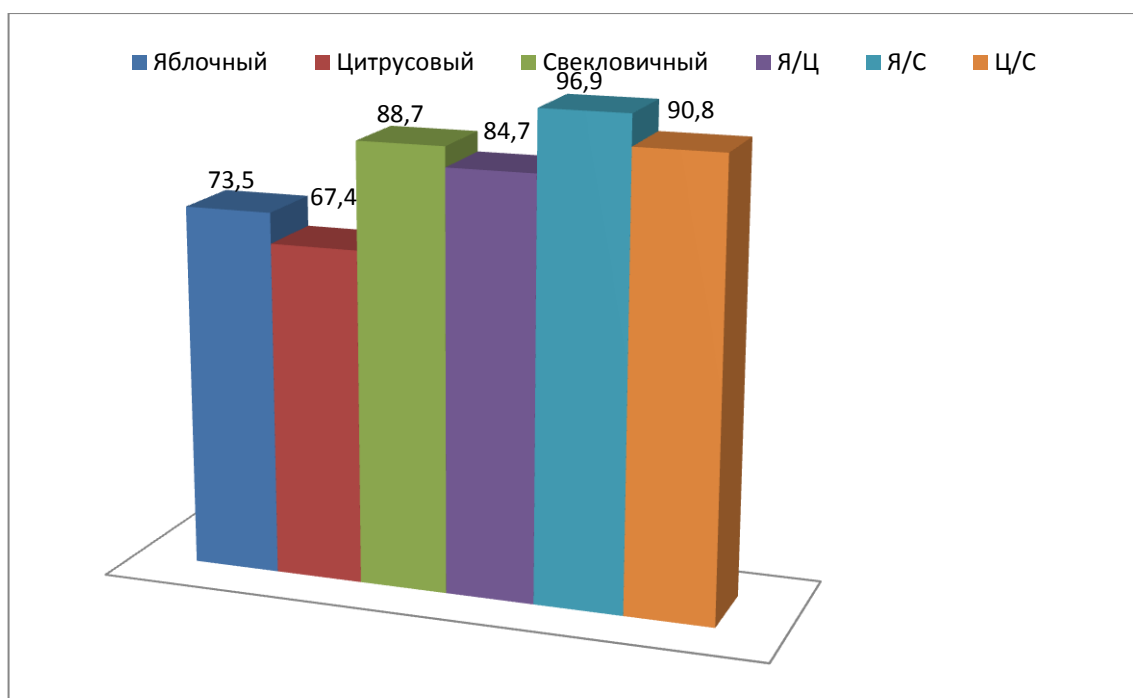


Рис. 2. Зависимость комплексообразующей способности различных видов пектиновых веществ и их комбинаций

Анализ данных рисунка 2 в части комплексообразующей способности исследуемых видов пектиновых веществ показывает, что наибольшую способность проявляет свекловичный пектин (88,7 %) при следующих условиях, определяемых на рисунке 1в: рН 2,2...2,6; массовая доля пектиновых веществ 1,5 %, продолжительность связывания «металл-пектин» 20...30 мин. Яблочный и цитрусовый пектины проявляют меньшую способность к комплексообразованию на 15,3 и 21,3 пункта соответственно.

Анализ данных рисунка 2 в части комплексообразующей способности исследуемых комбинаций пектиновых веществ показывает, что наибольшую способность проявляет комбинация ЯС (96,9 %), а комбинации ЯЦ и ЦС способны к комплексообразованию меньше на 12,2 и 6,1 пункта соответственно. Кроме этого, наименьшую

комплесообразующую способность из всех вариантов исследования показал цитрусовый пектин, а наибольшую – комбинация ЯС.

Выводы:

1. Получены математические модели комплексообразования различных видов низкоэтерифицированных пектиновых веществ и их комбинаций в зависимости от массовой доли пектиновых веществ, значения рН среды, продолжительности связывания «металл (Pb^{2+})-пектин» и уравнения регрессии. Значимость коэффициентов уравнений регрессии подтверждена результатами дисперсионного анализа. Коэффициенты детерминации уравнений свидетельствуют об адекватности полученных математических моделей.

2. Установлено, что при разных факторах эксперимента изменяется комплексообразующая способность различных видов пектиновых веществ и их комбинаций: ЯС (96,9 %) > ЦС (90,8 %) > С (88,7 %) > ЯЦ (84,7 %) > Я (73,5 %) > Ц (67,4 %).

3. Установлено, что понижение степени этерификации пектинов до уровня низкоэтерифицированных способствует повышению их к комплексообразованию. Однако свекловичный пектин, являющийся нативно низкоэтерифицированным, проявляет преимущественную способность к комплексообразованию, а в комбинациях с яблочным и цитрусовым модифицированными пектинами повышает их показатель на 23,4 пункта. В варианте комбинации ЯЦ прирост показателя составляет для яблочного и цитрусового пектинов 11,2 и 17,3 пункта соответственно.

4. Установлено, что объединенное комплексообразующее действие двух низкоэтерифицированных пектинов больше, чем при их раздельном использовании, что свидетельствует о синергетическом эффекте.

Литература:

1. Математическая статистика: учебник для вузов / Горяинов В.Б. Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 424 с.

2. Функциональные продукты питания: учебное пособие / Гаделева Х.К. [и др.]. Москва: КноРус, 2016. 303 с.

3. Барашкина Е.В. Разработка технологий жележных десертов функционального назначения: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01. Краснодар, 2003. 156 с.

4. Михеева Л.А. Изучение комплексообразующей способности пектина по отношению к меди и свинцу // Ульяновский медико-биологический журнал. 2017. №2. С. 111-116.

5. Хатко З.Н. Свекловичный пектин полифункционального назначения: свойства, технологии, применение. Майкоп: МГТУ, 2012. 244 с.

6. Хатко З.Н., Ашинова А.А. Комплексообразующая способность свекловичного пектина // Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса горных и предгорных территорий: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Горского ГАУ. Владикавказ, 2018. С. 93-97.

Literature:

1. *Mathematical statistics: a textbook for universities / Goryainov V.B. Moscow: MSTU named after N.E. Bauman, 2001. 424 p.*

2. *Functional foods: a textbook / Gadeleva Kh.K. [et al.]. Moscow: KnoRus, 2016. 303 p.*

3. Barashkina E.V. *Development of technologies of jelly desserts of functional purpose: dis. ... Cand. of Tech. Sciences: 05.18.01. Krasnodar, 2003. 156 p.*

4. Mikheeva L.A. *Study of the complexing ability of pectin in relation to copper and lead // Ulyanovsk Biomedical Journal. 2017. No. 2. P. 111-116.*

5. Khatko Z.N. *Beet pectin of multifunctional purpose: properties, technologies, application. Maikop: MSTU, 2012. 244 p.*

6. Khatko Z.N., Ashinova A.A. *Complex-forming ability of beet pectin // Scientific support of sustainable development of the agro-industrial complex of mountain and foothill territories: materials of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 100th anniversary of Gorsky State Agrarian University. Vladikavkaz, 2018. P. 93-97.*