

Профессор Г.О. Магомедов, доцент А.А. Журавлев,
доцент М.Г. Магомедов, аспирант А.А. Литвинова
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.), кафедра технологии хлебопекарного, макаронного
и кондитерского производств, тел. 8 (920) 432-89-31

Оптимизация условий ферментативной модификации пюре сахарной свеклы с использованием экспериментально- статистического подхода

Проведена оптимизация условий ферментативного гидролиза пюре сахарной свеклы. Гидролиз осуществляли ферментным препаратом Rohapect DA6L. Получены регрессионные уравнения, описывающие влияния дозировки ферментного препарата и температуры процесса на вязкостные свойства пюре. Установлены оптимальные значения факторов и параметра оптимизации процесса.

Optimization of conditions for enzymatic hydrolysis of sugar beet puree is performed. Hydrolysis was carried by the enzyme preparation Rohapect DA6L. Regression equations describing the effect of the dosage of enzyme preparation and process temperature on the viscosity properties of puree are obtained. The optimum values of the factors and parameter optimization are defined.

Ключевые слова: условия оптимизации, сахарная свекла, ферментный препарат, концентрированная паста.

В настоящее время перед хлебопекарной и кондитерской промышленностью стоит задача по созданию принципиально новых кондитерских и хлебопекарных изделий функционального назначения длительного срока хранения с целью экономии дефицитного сырья, совершенствования структуры ассортимента и снижения сахароемкости. Использование местных нетрадиционных видов растительного сырья может способствовать решению поставленной задачи.

Сахарная свекла – техническая культура с большим потенциалом применения в пищевой промышленности, использование которой в настоящее время недостаточно. Биохимический потенциал сахарной свеклы обуславливает широкие возможности ее применения в пищевой промышленности с целью повышения пищевой и биологической ценности продуктов питания. В связи с этим, актуальной является создание новой схемы переработки сахарной свеклы в полуфабрикат, который представляет собой концентрированную пасту с массовой долей сухих веществ 40-60 %.

Концентрированная паста из сахарной свеклы может стать альтернативой основному сырью кондитерского производства – сахару и патоке, выполняя структурообразующую роль

в кондитерских изделиях и повышая их пищевую ценность, сокращая при этом технологический процесс и значительно снижая себестоимость готовой продукции.

Качество концентрированной пасты зависит от вязкости используемого пюре, резкое возрастание которой при концентрировании замедляет процесс удаления влаги, усложняет работу оборудования, а также приводит к снижению органолептических и физико-химических показателей готовой продукции.

Как известно, вязко-пластичные свойства фруктового и овощного пюре обусловлены содержанием пектиновых веществ (протопектин, растворимый пектин, пектин межклеточного вещества), гемицеллюлоз и целлюлоз.

Для обеспечения равномерного протекания процесса концентрирования свекловичное пюре подвергали ферментативной обработке, использовали ферментный препарат нового поколения Rohapect DA6L (производитель – фирма AB Enzymes GmbH, Германия), который представляет собой высококонцентрированный комбинированный пектиназно-арабаназный ферментный препарат, полученный в результате ферментации штамма *Aspergillus niger*.

Приготовление свекловичного пюре и его дальнейшая переработка сопровождается механическими, теплообменными и массообменными процессами: перемешиванием,

транспортированием по трубопроводу, дозированием. При реализации указанных процессов происходит изменение структуры пюре, в результате чего его реологические свойства претерпевают значительные изменения, которые могут существенно влиять не только на качество готового изделия, но и на работу оборудования и его энергозатраты.

Кроме того, вопросы интенсификации, автоматизации и оптимизации процесса производства пюре не могут успешно решаться без знаний реологических свойств полуфабриката и закономерностей его реологического поведения.

Для оптимизации условий ферментативной модификации свекловичного пюре был применен экспериментально-статистический подход [2].

В качестве основных факторов выбраны (таблица 1): x_1 – дозировка ферментного препарата, % к массе пюре; x_2 – температура ферментации, °С. Выходным параметром у служила эффективная вязкость свекловичной массы, Па·с. Выбранные факторы совместимы и не коррелируют между собой. Вискозиметрические исследования проводили на вибровискозиметре SV-10.

Т а б л и ц а 1

Характеристики планирования

Условия планирования	Дозировка ферментного препарата x_1 , %	Температура ферментации x_2 , °С
Основной уровень (0)	0,06	65,90
Интервал варьирования	0,03	10,00
Верхний уровень (+1)	0,09	75,90
Нижний уровень (-1)	0,03	55,90
Верхняя «звездная» точка (+1,41)	0,10	80,00
Нижняя «звездная» точка (-1,41)	0,05	55,00

Первый этап заключался в построении регрессионного уравнения, адекватно описывающего зависимость выбранного выходного параметра от изучаемых факторов. Для этого был реализован активный эксперимент по системе центрального композиционного униформ-ротатбельного плана, обеспечивающего полу-

чение одинаковой величины дисперсии выходного параметра для любой точки в пределах изучаемой области. В результате статистической обработки экспериментальных данных получено уравнение регрессии (1), адекватно описывающее зависимость эффективной вязкости свекловичного пюре y от исследуемых факторов:

$$y = 5,83 + 0,26X_1 + 0,72X_2 - 0,2X_1X_2 + 0,03X_1^2 - 0,23X_2^2, \quad (1)$$

где X_i – кодированные значения факторов, связанные с натуральными значениями x_i соотношениями (2):

$$X_1 = \frac{x_1 - 0,06}{0,03}; \quad X_2 = \frac{x_2 - 65,9}{10}. \quad (2)$$

Второй этап заключался в геометрической интерпретации и анализе регрессионного уравнения. Графические интерпретации уравнения (1) в виде поверхности отклика и двумерных сечений представлены на рисунках 1, 2.

Анализ графических зависимостей (рисунки 1, 2) и уравнения регрессии (1) показал, что чувствительность эффективной вязкости свекловичного пюре к изменению температуры ферментации в несколько раз превышает аналогичную чувствительность к изменению дозировки ферментного препарата.

Из этого следует важный вывод: при практической реализации указанных режимов приготовления свекловичного пюре следует обеспечить строгое поддержание температуры ферментации на заданном значении, избегая ее значительных колебаний, которые могут привести к получению пюре с неудовлетворительными реологическими свойствами. К постоянству дозировки ферментного препарата, в свою очередь, могут быть предъявлены менее жесткие требования.

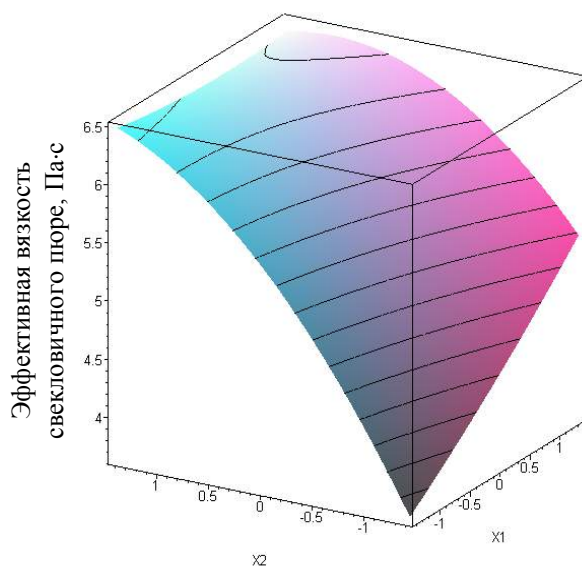


Рисунок 1 - Зависимость эффективной вязкости свекловичного пюре от дозировки ферментного препарата X_1 и температуры ферментации X_2

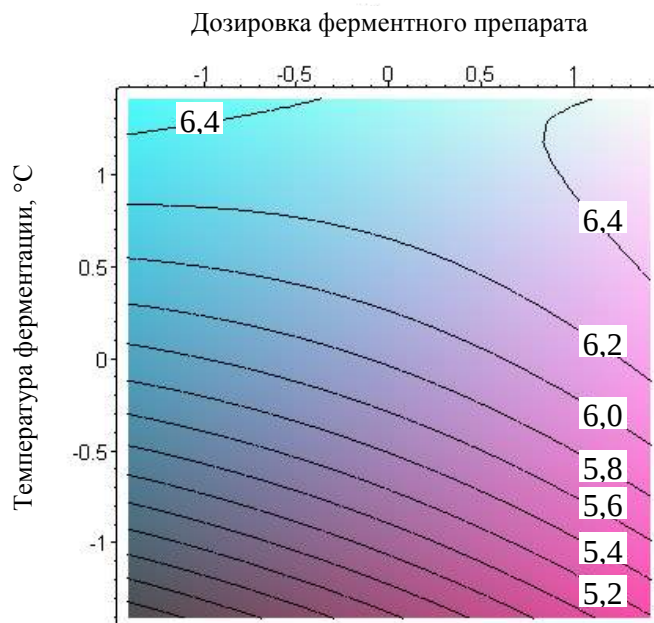


Рисунок 2 - Линии равного уровня эффективной вязкости свекловичного пюре (числа на кривых – значения эффективной вязкости, Па·с)

Третий этап заключался в поиске оптимальных режимов ферментативного гидролиза свекловичного пюре.

Задача оптимизации при этом была сформулирована следующим образом: необходимо найти такие значения независимых переменных X_1 и X_2 , при которых эффективная вязкость свекловичного пюре y достигает ми-

нимального значения. При этом независимые переменные X_1 и X_2 должны находиться в области эксперимента, границы которой определяются значениями факторов в «звездных» точках, т. е. $-1,41 \leq X_i \leq +1,41$.

Для этого запишем условие оптимизации в виде:

$$\begin{cases} y = 5,83 + 0,26X_1 + 0,72X_2 - 0,2X_1X_2 + 0,03X_1^2 - 0,23X_2^2 \rightarrow \min \\ X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 = R^2, \end{cases} \quad (3)$$

в котором последнее уравнение определяет границы области эксперимента (сфера радиусом R) и является ограничением на значения независимых переменных.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа. Для этого составим целевую функцию F вида:

$$F = 5,83 + 0,26X_1 + 0,72X_2 - 0,2X_1X_2 + 0,03X_1^2 - 0,23X_2^2 + \lambda(X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 - R^2), \quad (4)$$

где λ – неопределенный множитель Лагранжа.

В соответствии с вычислительным алгоритмом метода неопределенных множителей Лагранжа составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial X_1} = 0,26 - 0,2X_2 + 0,06X_1 + 2\lambda X_1 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial X_2} = 0,72 - 0,2X_1 - 0,46X_2 + 2\lambda X_2 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda} = X_1^2 + X_2^2 - R^2 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Для решения системы уравнений (5) с последующим вычислением значений функции отклика y воспользуемся интегрирован-

ным пакетом MAPLEW 10. Вычисления проводим при изменении радиуса сферы R в диапазоне от 0 до 1,5 (таблица 2).

Т а б л и ц а 2

Поиск оптимальных параметров

№ шага	R	X_1	X_2	λ	y , Па·с
1	0	0	0	2,913	5,830
2	0,2	-0,067	-0,188	2,177	5,666
3	0,4	-0,134	-0,377	1,221	5,480
4	0,6	-0,2	-0,566	0,902	5,276
5	0,8	-0,266	-0,754	0,742	5,049
6	1,0	-0,331	-0,943	0,646	4,800
7	1,2	-0,397	-1,132	0,583	4,531
8	1,4	-0,460	-1,321	0,537	4,240
9	1,41	-0,465	-1,331	0,535	4,225
10	1,6	-0,527	-1,51	0,503	3,929

Как видно из результатов оптимизации (таблица 2), движение по поверхности отклика от центра к ее периферии сопровождается постепенным уменьшением параметра оптимизации y . Однако оптимальными следует признать условия, полученные на 9 шаге оптимизации, так как в этом случае независимые переменные X_1 и X_2 не выходят за границы области эксперимента, а эффективная вязкость свековичной массы принимает минимальное значение.

Переходя от кодированных значений факторов к натуральным с учетом условий планирования (таблица 1), получим оптимальные значения факторов и параметра оптимизации: дозировка ферментного препарата $x_1 = 0,046$ % к массе пюре; температура фер-

ментации $x_2 = 52,59$ °С; эффективная вязкость свековичного пюре $y = 4,225$ Па·с.

Четвертый этап заключался в экспериментальной проверке оптимальных параметров и оценке степени точности и надежности полученного значения параметра оптимизации.

При оптимальных значениях дозировки ферментного препарата $x_1 = 0,046$ % к массе пюре и температуре ферментации $x_2 = 52,59$ °С были изготовлены образцы свековичного пюре ($n = 10$ шт.), в которых определяли эффективную вязкость. В таблице 3 представлены средние арифметические значения эффективной вязкости y^0 и дисперсии S^2 , полученные по результатам десяти параллельных опытов.

Как видно из таблицы 3, расчетное и экспериментальное значения эффективной вязкости несколько отличаются друг от друга. Для того, чтобы эти различия признать несущественными и объяснить только случайной

ошибкой, была выдвинута нуль-гипотеза о том, что расчетное и экспериментальное значения параметра оптимизации принадлежат к одной и той же генеральной совокупности.

Т а б л и ц а 3

Результаты оптимизации

Значение эффективной вязкости свекловичного пюре, Па·с		Дисперсия S^2	Расчетное значение критерия Стьюдента t_p	Ошибка δ , Па·с	Доверительный интервал эффективной вязкости свекловичного пюре, Па·с
Расчетное y^p	Экспериментальное y^3				
4,225	3,988	0,144	1,98	0,274	3,951÷4,499

Для проверки выдвинутой нуль-гипотезы воспользуемся распределением Стьюдента. При этом вычисляем расчетное значение критерия Стьюдента (таблица 3):

$$t_p = \frac{|y^3 - y^p|}{\sqrt{S^2}} \sqrt{n} \quad (6)$$

Сравнение величины t_p с табличным значением критерия Стьюдента $t_m = 2,29$ (при числе степеней свободы $f = 9$ и принятой доверительной вероятности $\gamma = 95\%$) показывает выполнение условия $t_p < t_m$. Это указывает на то, что выдвинутая нуль-гипотеза может быть принята, т. е. различия между расчетным и экспериментальными значениями эффективной вязкости свекловичного пюре следует признать несущественным (с доверительной вероятностью 95 %) и объяснить только случайной ошибкой. Ошибка предсказания значения параметра оптимизации (таблица 3):

$$\delta = \frac{t_\delta \sqrt{S^2}}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Результаты вычислений представлены в таблице 3 в виде доверительного интервала $y^\delta \pm \delta$ при принятой доверительной вероятности $\gamma = 95\%$.

Как видно из результатов таблицы 3, значение эффективной вязкости свекловичного пюре не выходит за границы доверительного интервала, полученного расчетным путем, что указывает на достоверность и надежность полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1 Дерканосова, Н.М. Практикум по моделированию и оптимизации потребительских свойств пищевых продуктов [Текст]: учебное пособие / Н.М. Дерканосова, А.А. Журавлев, И.А. Сорокина. – Воронеж: ООО «Главреклама», 2009. – 167 с.

2 Грачев, Ю.П. Математические методы планирования эксперимента [Текст] / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин. – М.: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.

REFERENCES

1 Derkanosova, N.M. Workshop on modeling and optimization of consumer properties of foods [Text]: a textbook / N.M. Derkanosova, A.A. Zhuravlev, I.A. Sorokina. – Voronezh: LLC "Glavreklama", 2009. - 167 p.

2 Grachev, Y.P. Mathematical methods of experimental design [Text] / Y.P. Grachev, Y.M. Plaxin. – M.: DeLee print, 2005. - 296 p.