

Экономико-математический подход к оптимизации вакуум-сублимационной сушки ферментного препарата инулиназы *Bacillus polymyxa* 29

Константин К. Полянский¹ tovar201@list.ru  0000-0002-8817-1466

¹ Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67а, г. Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. Одним из перспективных направлений совершенствования процессов переработки растительного сырья является биоконверсия с использованием ферментных препаратов, применение которых позволяет существенно изменить, интенсифицировать и усовершенствовать существующие технологии получения продуктов питания как систему энергоэффективных процессов. Объектом исследования является ферментный препарат инулиназы *Bacillus polymyxa* 29, обеспечивающий превращение растительного полимера инулина во фруктозу. Фруктоза имеет повышенный интерес в пищевых технологиях как более безопасная для здоровья человека альтернатива сахарозе. Выход фруктозы достигает 90–95%; коэффициент сладости фруктозы выше, по сравнению с сахарозой в 1,73 раза. Получение фермента с максимальной активностью достигается вакуум-сублимационной сушкой при программированном по времени режиме управления теплоподводом с учетом ограничений, обусловленных качеством фермента и экономической целесообразностью процесса. Предложена методология выбора оптимальных решений при вакуум-сублимационной сушке ферментного препарата *Bacillus polymyxa* 29 по показателю прибыли. Предлагаемый подход позволяет разрешить главное техническое противоречие между производительностью и энергозатратами. Установлена оптимальная загрузка сублиматора, обеспечивающая минимизацию удельных затрат электроэнергии для различных значений начального влагосодержания фермента.

Ключевые слова: ферментный препарат, инулиназа, фруктоза, вакуум-сублимационная сушка, удельный расход, энергозатраты

Economic and mathematical approach to optimization of vacuum-freeze drying of the enzyme preparation inulinase *Bacillus polymyxa* 29

Konstantin K. Polyansky¹ tovar201@list.ru  0000-0002-8817-1466

¹ Voronezh Branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanova, Karl Marx st., 67a, Voronezh, 394030, Russia

Abstract. One of the promising directions of improving the processes of processing plant raw materials is bioconversion using enzyme preparations, the use of which allows you to significantly change, intensify and improve existing technologies for the production of food products as a system of energy-efficient processes. The subject of the study is the enzyme preparation of inulinase *Bacillus polymyxa* 29, which ensures the conversion of the plant polymer inulin to fructose. Fructose has an increased interest in food technologies as a safer human health alternative to sucrose. Fructose yield reaches 90–95%; the sweetness coefficient of fructose is 1.73 times higher than sucrose. Production of enzyme with maximum activity is achieved by vacuum-sublimation drying at time-programmed mode of heat supply control taking into account limitations due to quality of heat exchange and economic feasibility of the process. Method of selection of optimal solutions in vacuum-sublimation drying of feather preparation *Bacillus polymyxa* 29 according to profit index is proposed. The proposed approach resolved the main technical gap between productivity and energy consumption. An optimal loading of the sublimator has been established, which ensures the minimization of specific electric power consumption for various values of the initial moisture drying of the enzyme, taking into account the given efficiency of the vacuum sublimation dryer.

Keywords: enzyme preparation, inulinase, fructose, vacuum-freeze drying, specific consumption, energy consumption

Введение

В последние годы биокаталитические технологии становятся все более востребованными, так как количество ферментов, эффективно используемых в различных областях промышленности, растет очень быстро [1].

Однако в научно-технической литературе отсутствуют научно обоснованные подходы к использованию фермента инулиназы *Bacillus polymyxa* 29 для получения биомодифицированных продуктов с заданными технологическими свойствами и их использование в технологии

хлебобулочных и мучных кондитерских изделий повышенного качества и пищевой ценности [2].

Инулиназа способствует превращению растительного полимера инулина в практически чистую фруктозу, или фруктоолигосахариды. Инулин накапливается как резервный полисахарид в таких сельскохозяйственных культурах, как, артишок, цикорий, топинамбур, якон и др. Фруктоза становится все более востребованной в пищевых технологиях как более безопасная для здоровья человека альтернатива сахарозе, которая способствует возникновению атеросклероза, ожирения, кариеса и диабета [3].

Для цитирования

Полянский К.К. Экономико-математический подход к оптимизации вакуум-сублимационной сушки ферментного препарата инулиназы *Bacillus polymyxa* 29 // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 2. С. 31–35. doi:10.20914/2310-1202-2020-2-31-35

For citation

Polansky K.K. Economic and mathematical approach to optimization of vacuum-freeze drying of the enzyme preparation inulinase *Bacillus polymyxa* 29. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 2. pp. 31–35. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-2-31-35

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Гидролиз инулина до фруктозы кислотным способом имеет ряд существенных недостатков, что повышает интерес к микробным инулиназам и их применению [4].

Использование инулиназ открывает широкую перспективу получения чистых фруктозных сиропов непосредственно из растительного сырья, из инулина, а не из крахмала. Выход фруктозы достигает 90–95%. Коэффициент сладости фруктозы выше, по сравнению с сахарозой в 1,73 раза, фруктоза значительно лучше растворяется в воде.

Следующее важное направление применение микробных инулиназ – это получение фруктоолигосахаридов из инулина, которые по последним данным обладают более высокой пребиотической активностью, чем высокомолекулярный инулин. Доказано, что инулин и олигофруктозиды избирательно стимулируют рост и метаболическую активность бифидо- и лактобактерий, не влияя на рост других культур и подавляя развитие потенциально патогенных бактерий. В терапии дисбактериозов лечение должно базироваться на использовании таких веществ, с помощью которых можно целенаправленно воздействовать на те или иные бактерии микробного пула с тем, чтобы они сами продуцировали для организма метаболиты, витамины, антибиотики и регуляторы.

Рядом исследователей были исследованы различные продуценты инулиназ, их физико-химические свойства и возможности широкого применения в пищевой индустрии [5–10].

Материалы и методы

Сублимационная сушка ферментных препаратов – один из самых дорогостоящих способов обезвоживания. Поэтому оптимизация режимов этого процесса с целью разработки высокоприбыльных технологий сушки является актуальной задачей [8].

Объект сушки – ферментный препарат инулиназы, полученный глубинным способом с использованием высокоэффективного продуцента микромицета *Bacillus polymyxa* 29. Инулиназа широко используется в микробиологической и пищевой промышленности (хлебопекарной, кондитерской, спиртовой и пищевых концентратной) в основном с целью гидролиза инулина до фруктозы и получения на ее основе многообразных продуктов диабетического назначения.

Получение фермента с максимальной активностью достигается вакуум-сублимационной сушкой при программированном по времени режиме управления теплоподводом с учетом ограничений, обусловленных качеством фермента и экономической целесообразностью процесса. Необходимость увеличения числа потенциально возможных управлений

требует увеличения числа оптимизируемых факторов процесса сублимационной сушки [7]. Однако определить задачу как выбор оптимального значения температуры сублимации, производительности, удельного расхода сырья и энергии было бы не совсем корректно по двум причинам.

Во-первых, такой вариант формулировки затрагивает, по крайней мере, сразу три искомого параметра, хотя они не являются независимыми. Во-вторых, оптимальное осуществление процесса сублимационной сушки зависит не только от варьируемых переменных, но и от случайных возмущений. Оптимальные режимы могут изменяться в зависимости от концентрации исходного препарата, технологического состояния линии вакуумирования, при возможных отклонениях неуправляемых факторов. Поэтому будем рассматривать задачу оптимизации как выбор оптимального режима для производства ферментного препарата инулиназы *Bacillus polymyxa* 29 на основании характеристик, полученных в результате балансовых испытаний процесса сушки в вакуум-сублимационной сушильной установке чешской фирмы Frigera с максимально возможным учетом неуправляемых факторов.

Результаты и обсуждение

В ходе испытаний в пределах каждого опыта фиксировалась загрузка сублиматора G_A . В интервале значений от 14 до 20 кг исходного фермента и задавался закон изменения энергоподвода:

$$q_{\text{opt}}(\tau) = \begin{cases} q_1 = q_{\text{max}} = \frac{\lambda_c (t_{\text{доп}} - t_s)}{h_I}, & 0 \leq \tau \leq \tau_I; \\ q_2 = \frac{\lambda_c (t_{\text{доп}} - t_s)}{\sqrt{h_I^2 + \frac{(\tau - \tau_I)^2}{A_n}}}, & \tau_I \leq \tau \leq \tau_k, \end{cases} \quad (1)$$

где $q_{\text{opt}}(\tau)$ – оптимальный закон изменения теплового потока греющих плит, Вт/м²; τ_I – длительность периода постоянного энергоподвода, ч; τ_{II} – длительность периода снижающегося энергоподвода, ч; τ – текущий момент времени, ч; λ_c – среднее значение коэффициента эффективной теплопроводности, Вт/(м×К); τ_k – время сушки, ч, $\tau_k = f(h)$; h – высота слоя фермента на противне, м ($h \approx 12 \times 10^{-3}$); h_I – высота поверхностного слоя, м ($h_I \approx 3,1 \times 10^{-3}$); t_s – температура сублимации, К; $t_{\text{доп}}$ – максимально допустимая температура нагрева фермента, К; $A_n = \tau_{II}/(h^2 - h_I^2)$.

Если не учитывать внешних связей процесса сублимационной сушки препарата с процессами его получения и предварительного

замораживания, а в качестве целевой функции принять показатель прибыли как частный случай приведенного дохода [2], то при отсутствии капитальных затрат критерий оптимальности будет иметь следующий вид:

$$R = C_A G_A - C_B G_B - C_3 N_3 - Z_{уп}, \quad (2)$$

где C_A и C_B – цена высушенного и исходного фермента, р/кг; C_A – цена электроэнергии, р / (кВт×ч); G_A и G_B – количество высушенного и исходного фермента соответственно, кг; $Z_{уп}$ – условно-постоянные затраты, р.

Расход потребляемой электроэнергии на процесс сушки N_3 (кВтч) определяли по формуле:

$$N_3 = (P_{П} + P_{ХК} + P_{ВН}) \tau_k, \quad (3)$$

где $P_{П}$, $P_{ХК}$, $P_{ВН}$ – соответственно средние за цикл сушки значения потребляемой мощности греющих плит, приводов компрессора десублиматора и вакуум-насоса, кВт.

Температуру сублимации t_s в (1) выбрали из ограничения $-24^\circ\text{C} < t_s < -20^\circ\text{C}$, т. е. в заранее известной области режимов, где расположен оптимум с точки зрения достижения цели (2).

Условно-постоянные затраты могут быть исключены из выражения критерия, как не зависящие от режима сушки. В этом случае

$$R = G_A \left(C_A - C_B \frac{G_B}{G_A} - C_3 \frac{N_3}{G_A} \right) \rightarrow \max. \quad (4)$$

Для поиска оптимальных решений необходимо, чтобы критерий находился в однозначной зависимости только от варьируемых параметров и заданных известных величин. Кроме варьируемого параметра G_B и заданных величин C_A , C_B , и C_3 , в него входят еще переменные G_A и N_3 .

В соответствии с балансом по влаге

$$G_A = G_B k, \quad (5)$$

где $k = (1 + u_k) / (1 + u_n)$; u_n , u_k – соответственно начальное и конечное влагосодержание фермента, кг/кг.

$$R = G_B k \left(C_A - \frac{C_B}{k} - \frac{C_3}{k} \frac{N_3}{G_B} \right) \rightarrow \max. \quad (6)$$

Оптимальный режим должен удовлетворять условию, которое можно получить, про дифференцировав выражение критерия оптимальности (6) по варьируемому параметру:

$$\frac{dR}{dG_B} = \left(k C_A - C_B - C_3 \frac{N_3}{G_B} \right) - C_3 \frac{dN_3}{dG_B} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{N_3}{G_B} + \frac{dN_3}{dG_B} = \frac{k C_A - C_B}{C_3}. \quad (8)$$

Правая часть уравнения (8) определена заданными значениями цен. Учитывая принципиальные вопросы ценообразования в условиях разбалансированной экономики, будем искать оптимальный режим на основании зависимости $(N_3 / G_B) = f(G_B)$ входящей в левую часть уравнения (8).

По экспериментальным данным, искомая зависимость была представлена полиномом третьей степени и для препарата с начальным влагосодержанием $u_n = 0,96$ получена в виде:

$$N_3 / G_B = 10 \times 10^{-4} G_B^3 - 58,8 G_B^2 + 0,652 G_B. \quad (9)$$

Условию ограничения $14 < G_B < 20$ удовлетворяет только одно его решение:

$$(G_B)_{opt} = 18 \text{ кг}. \quad (10)$$

В результате исключения из выражения целевой функции (7) постоянных величин показатель прибыли сводится к показателю расхода потребляемой электроэнергии на единицу массы фермента, загружаемого в сублиматор:

$$\frac{N_3}{G_B} = \frac{(\sum P) \tau_k}{G_B} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Полученный критерий (11) существенно отличается от целевой функции (7) по своему экономическому содержанию. Но при сравнении вариантов решения, а также для проверки «чувствительности» оптимума можно использовать функцию (11), как и любую другую из множества функций, получаемых в результате модификации функции цели (7). По численным значениям критерия (11) при более высокой и более низкой загрузках сублиматора G_B эффективность процесса снижается при некоторых отклонениях от найденного оптимального значения.

Проанализировано влияние начального влагосодержания фермента на смещение (сдвиг) оптимума (рисунок 1). Из анализа следует, что оптимальную загрузку $(G_B)_{opt}$ необходимо выбирать из условия экстремума характеристик $N_3 / G_B = f(G_B, u_n)$, эмпирические коэффициенты которых a , b , c определены экспериментально (таблица 1).

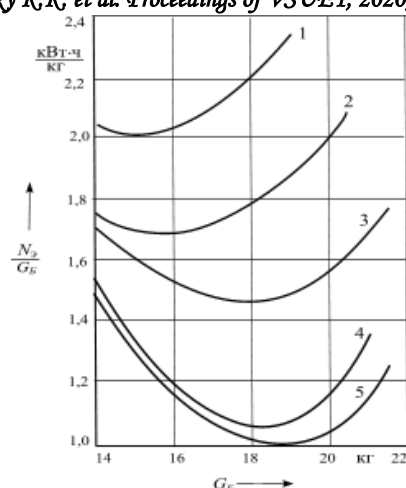


Рисунок 1. График зависимости $N_3/G_B = f(G_B)$ при различных значениях начального влагосодержания фермента u_H : 1 – 0,98; 2 – 0,97; 3 – 0,96; 4 – 0,95; 5 – 0,94

Figure 1. Graph of the dependence of $N_3/G_B = f(G_B)$ for different values of the initial moisture content of the enzyme in: 1 – 0,98; 2 – 0,97; 3 – 0,96; 4 – 0,95; 5 – 0,94

Таблица 1.
Эмпирические коэффициенты в уравнении 9

Table 1.
Empirical coefficients in equation 9

u_H , кг/кг	$\left(\frac{N_3}{G_B}\right)_{\min}$	$(G_B)_{\text{опт}}$, кг	Значение коэффициентов Values		
			$a \times 10^{-4}$	b	$c \times 10^{-3}$
0,94	1,01	19,07	15,00	-0,060	65,18
0,95	1,07	18,88	15,09	-0,060	65,18
0,96	1,47	17,99	15,09	-0,058	65,18
0,97	1,70	16,03	15,09	-0,055	60,00
0,98	2,02	15,02	17,00	0,060	65,18

Это обстоятельство в значительной мере снижает вероятность выбора ошибочных решений при оптимизации.

Заключение

В общем случае методология выбора оптимальных решений сублимационной сушки ферментного препарата инулиназы *Bacillus polymyxa* 29 при программированном по времени режиме управления параметрами теплоподвода представляется совокупностью критерия оптимальности, математического описания внутренних связей процесса и ограничений:

$$\begin{cases} R = G_B k \left(C_A - \frac{C_B}{k} - \frac{C_3}{k} \frac{N_3}{G_B} \right) \rightarrow \max. \\ \frac{N_3}{G_B} = a G_B^3 - b G_B^2 + c G_B; \\ 14 \leq G_B \leq 20; 0,94 \leq u_H \leq 0,98; \end{cases} \quad (12)$$

В экономической кибернетике математическую постановку задачи (12) называют экономико-математической моделью (ЭММ). Этот термин не полностью согласуется с понятием математической модели при описании процессов тепломассопереноса, принятым в практике. Здесь под моделью понимается собственно математическое описание объекта или часть его, используемая в постановке оптимизационной задачи. По предлагаемой методологии постановка задачи содержит критерий оптимальности R , математическую модель $(N_3/G_B) = f(G_B, u_H)$ и ограничения.

Литература

- 1 Мажулина И.В., Тертычная Т.Н., Шевцов А.А. Исследование оптимальных условий ферментативного гидролиза инулина инулиназой *Bacillus polymyxa* 29 // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2015. № 5. С. 26–36.
- 2 Holyavka M.G., Kovaleva T.A., Grechikina M.V., Ostankova I.V. et al. Inulinases from various producers: the features of their permolecular organization // Applied biochemistry and microbiology. 2014. V. 50. P. 10–16.
- 3 Рутковская Т.Р., Шуваева Г.П., Корнеева О.С. Инулиназа дрожжей *Sacharomyces cerevisiae* ВГПШ-2. Препаративное получение и некоторые физико-химические // Фундаментальные исследования. 2010. № 10. С. 17–25.
- 4 Шевцов А.А., Дранников А.В., Тертычная Т.Н., Шабунина Е.А. и др. Энергосберегающая биотехнология получения порошкообразных препаратов из биомассы фотоавтотрофных микроорганизмов // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2016. № 6. С. 98–107.
- 5 Полянский К.К., Алексеева Т.В., Калгина Ю.О. и др. Ферментированная йогуртная молочная основа для соусов // Молочная промышленность. 2019. № 7. С. 30–31.
- 6 Пат. № 2480520, RU, С 12M 1/02, 1/36, F26B 5/06. Способ управления процессами получения и сушки ферментных препаратов / А.А. Шевцов, Т.Н. Тертычная, И.В. Мажулина; заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. университет инженерных технологий. № 2011140150/06; Заявл. 03.10.2011; Опубл. 27.04.2013, Бюл. № 12.
- 7 Шевцов А.А., Мажулина И.В. Выбор оптимальной загрузки сублиматора по величине удельных энергозатрат при вакуум-сублимационной сушке ферментного препарата инулиназы // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2012. № 1. С. 16–21.
- 8 Родионова Н.С., Разинкова Т.А., Попов Е.С., Полянский К.К. и др. Экзополисахаридная активность пробиотических микроорганизмов при разных режимах ферментации // Молочная промышленность. 2020. № 4. С. 28–30.
- 9 Шевцов А.А., Золотарев Ю.Н., Мажулина И.В. Математическая модель десублимации при вакуум-сублимационной сушке // Известия вузов. Пищевая технология. 2013. № 4. С. 93–95.
- 10 Ma Y., Wu X., Zhang Q., Giovanni V. et al. Key composition optimization of meat processed protein source by vacuum freeze-drying technology // Saudi journal of biological sciences. 2018. V. 25. № 4. P. 724–732.

References

- 1 Mazhulina I.V., Tertychnaya T.N., Shevtsov A.A. Investigation of optimal conditions for enzymatic hydrolysis of inulin by *Bacillus polymyxa* inulinase 29. News of the Timiryazev agricultural Academy. 2015. no. 5. pp. 26–36. (in Russian).
- 2 Holyavka M.G., Kovaleva T.A., Grechikina M.V., Ostankova I.V. et al. Inulinases from various producers: the features of their permolecular organization. Applied biochemistry and microbiology. 2014. vol. 50. pp. 10–16.
- 3 Rutkovskaya T.R., Shuvaeva G.P., Korneeva O.S. Inulinase of yeast *Sacharomyces cerevisiae* VGSH-2. Preparative preparation and some physical and chemical. Fundamental research. 2010. no. 10. pp. 17–25. (in Russian).
- 4 Shevtsov A.A., Drannikov A.V., Tertychnaya T.N., Shabunina E.A. et al. Energy-saving biotechnology for obtaining powdery preparations from the biomass of photoautotrophic microorganisms. News of the Timiryazev agricultural Academy. 2016. no. 6. pp. 98–107. (in Russian).
- 5 Polyansky K.K., Alekseeva T.V., Kalugina Yu. O. et al. Fermented yogurt milk base for sauces. Dairy industry. 2019. no. 7. pp. 30–31. (in Russian).
- 6 Shevtsov A.A., Tertychnaya T.N., Mazhulina V.I. Method for controlling the processes of obtaining and drying enzyme preparations. Patent RF, no. 2480520, 2013.
- 7 Shevtsov A.A., Mazhulina I.V. Choosing the optimal load of the sublimator by the amount of specific energy consumption during vacuum-freeze drying of the inulinase enzyme preparation. Proceedings of VSUET. 2012. no. 1. pp. 16–21. (in Russian).
- 8 Rodionova N.S., Razinkova T.A., Popov E.S., Polyansky K.K. et al. Exopolysaccharide activity of probiotic microorganisms in different fermentation modes. Dairy industry. 2020. no. 4. pp. 28–30. (in Russian).
- 9 Shevtsov A.A., Zolotarev Yu.N., Mazhulina I.V. Mathematical model of desublimation during vacuum-freeze drying. University news. Food technology. 2013. no. 4. pp. 93–95. (in Russian).
- 10 Ma Y., Wu X., Zhang Q., Giovanni V. et al. Key composition optimization of meat processed protein source by vacuum freeze-drying technology. Saudi journal of biological sciences. 2018. vol. 25. no. 4. pp. 724–732.

Сведения об авторах

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра коммерции и товароведения, Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67а, г Воронеж, 394030, Россия, tovar201@list.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Information about authors

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, commerce and commodity department, Russian Economic University named after G.V. Plekhanova, Karl Marx st., 67a Voronezh, 394030, Russia, tovar201@list.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Вклад авторов

Константин К. Полянский написал рукопись, редактировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат

Contribution

Konstantin K. Polyansky wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 04/05/2020	После редакции 13/05/2020	Принята в печать 21/05/2020
Received 04/05/2020	Accepted in revised 13/05/2020	Accepted 21/05/2020