

ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

МРНТИ 65.29.29

*А.О. Байкенов¹, Ж.Т. Ботбаева¹, Т.М. Коптлеуова¹, К.А. Елеуенова¹,
К.А. Байгенжинов¹, А.Р. Туякова¹, Ж.А. Есимова¹*

¹ Казахский научно-исследовательский институт перерабатывающей и пищевой промышленности, Астанинский филиал, г. Нур-Султан, Казахстан

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ГЛЮКОЗНОГО СИРОПА

Аннотация. Эффективность технологических режимов распылительной сушки имеет решающее значение для работы крахмалопаточных производств, определяя выход и качество готовой продукции. Поиск новых способов, оптимальных технологических режимов получения сухих глюкозных сиропов является важным фактором повышения результативности крахмалопаточного производства. В данной статье рассмотрена возможность установления оптимальных технологических режимов сушки глюкозных сиропов на основе математического моделирования для эффективного процесса получения сухого глюкозного сиропа.

Ключевые слова: глюкозный сироп, технологические режимы, распылительная сушка, сухие вещества.

• • •

Түйіндеме. Дайын енімнің шығымын және сапасын анықтайтын бүріккіш кептіргіштердің тиімді технологиялық тәртібі крахмал-сірне өнеркәсіптерінің жұмысы үшін ең маңызды шешімге ие. Крахмал-сірне өнеркәсіптерінің нәтижесін арттырудың ең басты факторы құрғақ глюкозды шәрбат алудың жаңа әдістерін, тиімді технологиялық тәртібін іздеу болып отыр. Бұл мақалада құрғақ глюкозды шәрбат алудың тиімді процесін іске асыру үшін математикалық модельдеу негізінде глюкозды шәрбатты кептірудің тиімді технологиялық тәртібін белгілеу мүмкіндігі қаралған.

Түйінді сөздер: глюкоза шәрбаты, технологиялық тәртіптер, бүріккіш кептіргіш, құрғақ заттар.

• • •

Abstract. The effectiveness of the technological modes of spray drying is crucial for the operation of starch-making industries, determining the yield and quality of the finished product. The search for new methods and optimal technological

regimes for obtaining dry glucose syrups is an important factor in increasing the effectiveness of starch production. This article discusses the possibility of establishing the optimal technological regimes of drying glucose syrups on the basis of mathematical modeling for an effective process of obtaining dry glucose syrup.

Key words: glucose syrup, technological regimes, spray drying, solids.

Введение. Рынок сахара в Казахстане зависит напрямую от привозного сырья. Согласно данным статистики, лишь 5% сахара на прилавках страны из свеклы местных фермеров, еще 40% - прямой импорт готового сахара (преимущественно из России), остальные 55% сладкого продукта - условно «местное» производство, основанное на переработке бразильского и кубинского сахарного тростника казахстанскими заводами. По факту получается, что рынок сахара в Казахстане на 95% зависит от внешних поставок [1]. Анализ рынка белого сахара показал, что в 2016 г. в РК импортировано 78509,9 т белого сахара на сумму 41936,2 тыс. долл. США, в 2017 г. – 183000,0 т на сумму 46920,0 тыс.долл. США, в 2018 г. – 709955,5 т на сумму 336467.1 тыс.долл.США. Импорт крахмальных патоки и сиропов в 2016 г. составил 1008,1 т на сумму 1656,4 тыс. долл. США, в 2017 г. – 2949,1 т на сумму 1335,4 тыс. долл. США, в 2018 г. – 2663,5 т на сумму 1039,7 тыс. долл. США (данные Комитета таможенного контроля РК)., т.е. наблюдается высокая зависимость Казахстана от импорта сахара и сахаристых продуктов, что угрожает продовольственной безопасности страны.

Альтернативными натуральными источниками подслащающих компонентов являются сахаристые крахмалопродукты: глюкозные, мальтозные, глюкозно-фруктозные сиропы, мальтодекстрины и другие, которые получают из зерна кукурузы, пшеницы, тапиоки, тритикале, сорго и т.д. По опубликованным данным производство сахаристых крахмалопродуктов из зернового сырья рентабельнее на 30-45% производства сахара из сахарной свеклы [2,3].

Однако глюкозный сироп имеет ряд своих минусов таких как: хранение, транспортировка в специальной дефицитной, дорогостоящей таре. Сиропы, залитые в бочки, фляги и другие транспортируемые емкости хранят в закрытом складском помещении без посторонних запахов, предохраняющем от воздействия прямых солнечных лучей. Для хранения сиропов необходимо использовать стационарные емкости из нержавеющей или углеродистой стали с

полимерным покрытием, оборудованные системой поддержания постоянной температуры. Температура хранения: 30-35°C при условиях, исключающих возможность кристаллизации сиропов [4]. Учитывая выше изложенное, в последние годы получила особенно большое развитие технология получения различных сиропов в сыпучем виде. Их преимущества очевидны: расширение ассортимента, повышение эффективности при последующем их использовании в технологических процессах, улучшение качества, увеличение сроков хранения в результате подавления развития микрофлоры [5].

При распылительной сушке моносахаридов частицы порошка прилипают к стенкам сушилки, что приводит к эксплуатационным проблемам и низкому выходу продукта [6]. В процессе часто встречается проблема с большим количеством когезии сиропа на стенках распылительной сушилки [7]. Еще одна проблема представляет собой совместную адгезию высушенных частиц. Оба явления являются следствием высокой липкости смеси с высоким содержанием низкомолекулярных сахаров [8], которые имеют высокую гигроскопичность, термопластичность и низкую температуру стеклования [9]. Проблема залипания на стенках распылительной сушилки и увеличение выхода сухих сиропов богатых сахарами, может быть решена путем добавления надлежащих сухих добавок. Наиболее часто используемые методы предполагают добавление вспомогательного средства с высокой температурой стеклования (термопластичностью) такого как мальтодекстрин [10-12].

Несмотря на кажущуюся простоту технологии производства сухих сиропов, во всех странах мира проводятся обширные исследования технологических потоков производства сухих сахаристых крахмалопродуктов, направленные на совершенствование существующих технологий, создание оборудования нового поколения, расширения видов продукции с ориентацией их на конкретную группу потребителей [13].

Объекты и методы исследования. Объекты исследования – глюкозный сироп, мальтодекстрин. Технологические свойства глюкозного сиропа оценены по ГОСТ 33917-2016 «Патока крахмальная. Общие технические условия». Качество мальтодекстрина оценили по ГОСТ 34274 – 2017 «Мальтодекстрины. Технические условия». Получение сухих глюкозных сиропов было проведено на распылительной сушилке марки BUCHI 190 Mini Spray Dryer.

Для получения и оценки качества сухого глюкозного сиропа

использовали свод федеральных актов Code of Federal Regulations Title 21, U.S.21 CFR Ch. I (4–1–99 Edition).

Результаты и их обсуждение. Проведены научные исследования по разработке технологических режимов получения сухого глюкозного сиропа на лабораторной распылительной сушилке BUCHI 190 Mini Spray Dryer (Швейцария) производительностью 1200 мл/ч и температурой нагрева до 200°C. Для проведения исследований в качестве сырья был взят глюкозный сироп из кукурузного крахмала отечественного производства, соответствующий требованиям ГОСТ 33917-2016 «Патока крахмальная. Общие технические условия» и мальтодекстрин соответствующий требованиям ГОСТ 34274 – 2017 «Мальтодекстрины. Технические условия».

Для получения математической модели технологического процесса по сушке глюкозного сиропа, представляющую собой уравнение регрессии, использовали рототабельный план второго порядка (план Бокса), когда число факторов K 3 число опытов более 20, число опытов в нулевой точке составило 6 и число коэффициентов уравнения – 10.

В качестве математического аппарата использованы математико-статистические методы и получена система уравнений регрессии, которая моделирует взаимосвязи наиболее предпочтительного критерия оптимальности с остальными. На технологические показатели процесса сушки глюкозного сиропа, которые приняты в качестве критериев оптимальности, влияют факторы, определяющие конкретные производственные условия. Поэтому целесообразно корректировать систему уравнений регрессии в соответствии с этими факторами. На новое проведение экспериментальных исследований по сушке глюкозного сиропа установлены следующие факторы: температура на входе сушильную камеру ($T, ^\circ\text{C}$), объем подачи глюкозного сиропа ($V, \text{мл/мин}$) и содержание сухих веществ ($СВ, \%$) оказывающие влияние на критерии оптимизации – выхода готовой продукции ($ВГП, \%$).

Далее была проведена кодировка интервалов и уровней варьирования параметров, которые представлены в таблице 1. Матрица планирования представлена в таблице 2.

Таблица 1 - Кодирование интервалов и уровней варьирования входных факторов

Факторы		Уровни варьирования					Интервалы варьирования
Наутральные	Кодирование	-1,68	-1	0	+1	+1,68	
$T_{\text{суш}}$, °C	x_1	125	135	145	155	165	10
V , мл/мин	x_2	4	4,5	5	5,5	6	0,5
CB, %	x_3	30	35	40	45	50	5

Таблица 2 - Матрица рототабельного планирования экспериментальных исследований процесса сушки глюкозного сиропа

№	Кодированные значения			Натуральные значения			Экспериментальные значения
	x_1	x_2	x_3	T , °C	V , мл/мин	CB, %	ВПП, %
1	2	3	4	5	6	7	9
1	-	-	-	135	4	35	42
2	-	-	+	135	5	45	39
3	-	+	-	135	6	35	37
4	-	+	+	135	4	45	36
5	+	-	-	155	5	35	50
6	+	-	+	155	6	45	46
7	+	+	-	155	4	35	40
8	+	+	+	155	5	45	39
9	-1,68	0	0	125	6	40	35
10	+1,68	0	0	165	4	40	53
11	0	-1,68	0	145	5	40	47
12	0	+1,68	0	145	6	40	40
13	0	0	-1,68	145	4	30	44
14	0	0	+1,68	145	5	50	39
15	0	0	0	145	6	40	40

Таблица 3 - Значения доверительных интервалов критерия оптимизации для y_1 (ВПП, %)

Процесс испытания сушки глюкозного сиропа		Параметр	Доверительные интервалы			
			Δb_n	Δb_c	Δb_s	Δb_p
Выход готовой продукции	ВПП, %	y_1	$\pm 1,98$	$\pm 1,31$	$\pm 1,28$	$\pm 1,71$

Коэффициент уравнения регрессии является значимым если его абсолютная величина больше доверительного интервала. В противном случае он не имеет значение и может быть исключен из дальнейшего рассмотрения математической моделью. Сравнивая значения доверительных интервалов из таблицы 3 с соответствующими коэффициентами регрессии в таблице 4 можно сделать вывод о том, что эффекты взаимодействия выходных факторов незначительны, и ими можно пренебречь.

Таблица 4 - Коэффициенты уравнений регрессии выходных параметров для y_1 (ВПГ, %)

Критерий оптимизации	Коэффициенты	Выход готовой продукции
	При кодированных значениях факторов	
	b_0	38,4269584
	b_1	-0,30744
	b_2	-0,96917
	b_3	-0,04392
	b_{12}	-1,125
	b_{13}	-0,125
	b_{23}	0,625
	b_{11}	1,097613
Выход готовой продукции сухого глюкозного сиропа, %	b_{22}	1,450413
	b_{33}	0,744813
	При натуральных значениях факторов	
	B_0	319,7834
	B_1	-1,92733
	B_2	-33,4532
	B_3	-3,26212
	B_{12}	-0,225
	B_{13}	-0,0025
	B_{23}	0,25000
	B_{11}	0,010976
	B_{22}	5,801651
	B_{33}	0,029793

Уравнение регрессии(1):

$$y_1 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 \quad (1)$$

Уравнение регрессии выхода готовой продукции (2):

$$y_1 = 38,4269584 - 0,30744x_1 - 0,96917x_2 - 0,04392x_3 - 1,125x_1x_2 - 0,1255x_3 + 0,625x_2x_3 + 1,097613x_1^2 + 1,450413x_2^2 + 0,744813x_3^2 \quad (2)$$

Раскодирование независимых переменных в уравнениях. Получим уравнение регрессии при натуральных значениях факторов(3):

$$ВГП = 319,7834 - 1,92733T - 33,4532V - 3,26212СВ - 0,225TV - 0,0025 + 0,25000VСВ + 0,010976T^2 + 5,801651V^2 + 0,029793СВ^2 \quad (3)$$

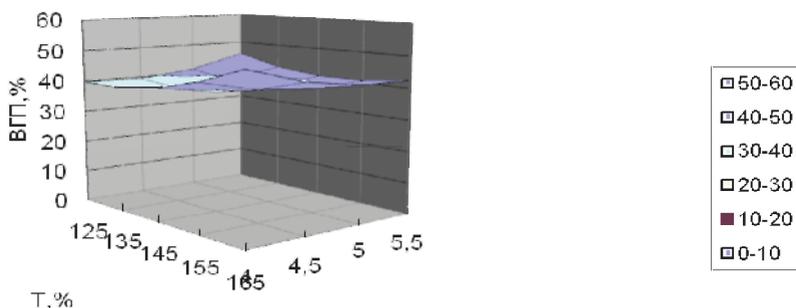


Рисунок 1 – Трехмерная модель в пространстве, характеризующая зависимость $y_n = f(T, V)$ температуры на входе ($T, ^\circ\text{C}$) и объема подачи глюкозного сиропа (V , мл/мин) на выход готовой продукции (ВГП,%)

На данном этапе оптимизации параметров сушки глюкозного сиропа особый интерес представляет собой температура на входе в сушильную камеру, как характеристика, определяющая один из основных параметров сушки глюкозного сиропа, влияющего на выход готовой продукции. Получены зависимости (рисунки 1-3) влияния основных параметров (температура на входе в сушильную камеру ($T, ^\circ\text{C}$)), объема подачи глюкозного сиропа (V , мл/мин), содержания сухих веществ ($СВ$, %) на процесс сушки сиропа в распылительной сушилке. На рисунке 1 видно, что начальное состояние выхода готовой продукции уменьшается с понижением температуры на входе в сушильную камеру и с увеличением объема подачи глюкозного сиропа. В диапазоне объема подачи сиропа от 4 до 4,5 мл/мин. наблюдается

наибольший выход готовой продукции. На температурном участке с понижением температуры на входе до 125°С происходит уменьшение выхода готовой продукции не зависимо от объема подачи глюкозного сиропа, свыше 125°С выход продукции планомерно идет на подъем. Пик выхода готовой продукции приходится на точку где объем подачи глюкозного сиропа составляет 4 мл при максимальной температуре на входе в 165°С, в этой точке максимальный выход готовой продукции составил 53%. Отсюда можно сделать вывод, что при уменьшении объема подачи глюкозного сиропа и увеличении температуры, сироп успевает высушиться более качественно, что ведет за собой увеличение выхода готовой продукции.

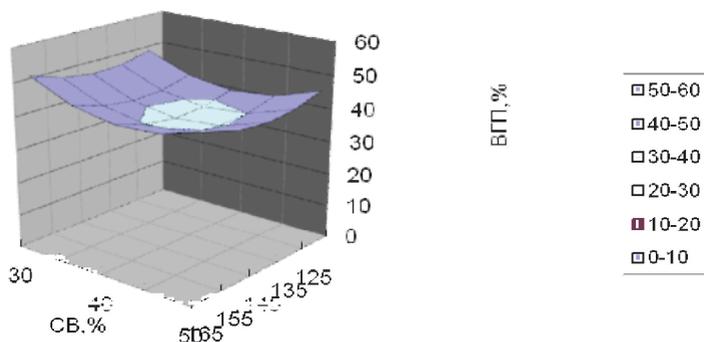


Рисунок 2 – Трехмерная модель в пространстве, характеризующая зависимость $y_n=f(T, СВ)$ температуры на входе ($T, ^\circ\text{C}$) и содержание сухих веществ ($СВ, \%$) на выход готовой продукции ($ВГП, \%$)

Из модели данной на рисунке 2 следует, что при температуре 125°С выход готовой продукции снижается по сравнению, с температурой 165°С. Относительно оси расположение содержания сухих веществ видно, что на пиковых точках 30% наблюдается подъем, т.е. наибольший выход готовой продукции. Пик выхода готовой продукции приходится на отметке содержания сухих веществ 30% и температуры на входе в сушильную камеру 165°С. Из этого можно сделать вывод, чем меньше содержание СВ и выше температура на входе в сушильную камеру, тем легче протекает процесс сушки глюкозного сиропа.

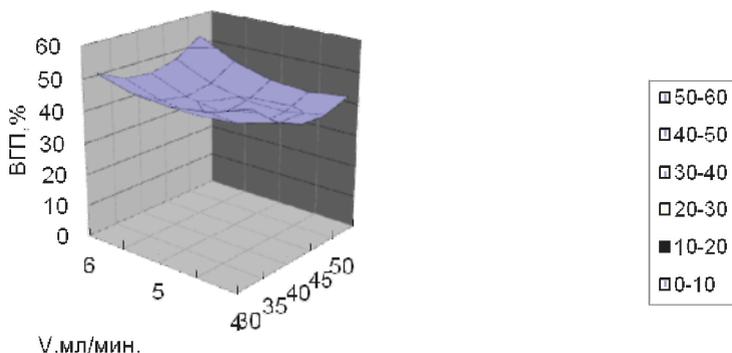


Рисунок 3 – Трехмерная модель в пространстве, характеризующая зависимость $y_n = f(V, CB)$ объема подачи глюкозного сиропа (V , мл/мин) и содержания сухих веществ (CB , %) на выход готовой продукции (BPP , %)

На трехмерной модели рисунка 3 показано как содержание сухих веществ и объем подачи сиропа оказывают влияние на выход готовой продукции. При минимальных значениях объема подачи сиропа составляющий 4 мл/мин. и содержания сухих веществ в 30% выход готовой продукции составил 51%. Максимальный выход продукции, как было указано ранее, протекает при CB 30%, и объеме подачи глюкозного сиропа 4 мл/мин. Исследованиями установлено, что с увеличением CB в глюкозном сиропе и с увеличением подачи его в сушильную камеру уменьшается выход готовой продукции. Это связано с тем, что в определенном объеме воздуха можно просушить определенное количество влаги и от температуры плавления самого продукта, которая может вызвать адгезию и когезию на стенках распылительной сушилки, которая так же влияет на выход готовой продукции. Таким образом, исходя из математической модели можно выбрать оптимальные параметры сушки глюкозного сиропа: температура на входе в распылительную камеру равна максимальному значению $165^{\circ}C$, объем подачи глюкозного сиропа 4 мл/мин. и содержание сухих веществ равно 30%. Исследованиями установлено, что полученный сухой глюкозный сироп по своим качественным характеристикам соответствует требованиям Code of Federal Regulations Title 21, U.S.21 CFR Ch. I (4–1–99 Edition) и может быть использован по целевому назначению.

Выводы. На основании изучения взаимосвязей и взаимозависимостей, экспериментально установлены оптимальные режимы технологического процесса получения сухого глюкозного сиропа с применением распылительной сушилки. На основании регрессионного анализа получено универсальное уравнение, позволяющее прогнозировать выход готовой продукции в зависимости от содержания сухих веществ, температуры на входе в сушильную камеру, а также от объема подачи глюкозного сиропа в распылительную камеру.

Список литературы

1 Сайт «Qazaq zerno». Электронный ресурс: <http://www.kazakh-zerno.kz>

2 Полумбрик М.О., Литвяк В.В., Ловкис З.В., Ковбаса В.Н. Углеводы в пищевых продуктах Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию. Национальный университет пищевых технологий, – 2016. – С. 591. ISBN 978-985-7133-59-8 (в пер.). – [16-202].

3 Hull P. Glucose syrups: technology and applications. // Wiley - Black-well. - 2010. P. - 392.

4 Сайт «Cargill». Электронный ресурс: <https://www.cargill.ru/ru>

5 Francis F.J. Wiley encyclopedia of food science and technology // Wiley&Sons, edition 2th. - New York. - 2009. – P. 3130.

6 Khalid Muzaffar, Gulzar Ahmad Nayik and Pradyuman Kumar // Stickiness Problem. – P. 125 – 145.

7 Wang S., Langrish T. Food Research International 42. – 2009. – P. 13 – 25.

8 Adhikari B., Howes T., Troung V. Drying Technology 21. – 2003. – P. 839 – 873.

9 Khalid M., Gulzar Ahmad Nayik and Pradyuman Kumar. Stickiness Problem Associated with Spray Drying of Sugar and Acid Rich Foods: A Mini Review // Department of Food Engineering and Technology / Sant Longowal Institute of Engineering and Technology, Longowal. Punjab – 148106. – India. - 2015. – P. 8 – 14.

10 *Bhandari B.R., Datta N., Howes T.* Drying Technology 15. – 1997. – P. 671–684.

11 *Adhikari B., Howes T., Bhandari BR., Troung V.* Effect of addition of maltodextrin on drying kinetics and stickiness of sugar and acid – rich foods during convective drying: experiments and modeling // Journal of Food Engineering 62. – P. 53 – 68. – 2004.

12 *Truong V., Bhandari BR., Howes T.* // Optimization of co-current spray drying process of sugar-rich foods. Part I – Moisture and glass transition temperature profile during drying, Journal of Food Engineering 71. – P. 55–65. – 2005.

13 *Андреев Н.Р.* Основы производства нативных крахмалов // М: Пищепромиздат. – 2001. – С. 289.

Байкенов А.Ө., магистр техники и технологии, e-mail: alibek_89_89@mail.ru

Ботбаева Ж.Т., кандидат биологических наук, e-mail: zhanar.b.t.@mail.ru

Коптлеуова Т.М., магистрант, e-mail: tolkin1970@mail.ru

Елеукенова К.А., кандидат биологических наук, e-mail: kamarsulu70@mail.ru

Байгенжинов К.А., магистрант, e-mail: baigenzhinov@inbox.ru

Туякова А.Р., бакалавр техники и технологии, e-mail: niizpp@mail.ru

Есимова Ж.А., Магистр техники и технологии, e-mail: z.yessimova@rpf.kz