

Профессор А.А. Шевцов, доцент А.В. Дранников,
аспирант А.С. Муравьев

(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского,
макаронного и зерноперерабатывающего производств, тел. 255-38-51

Оптимизация процесса сушки фильтрата послеспиртовой барды

Исследованы взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки фильтрата послеспиртовой барды. Получены рациональные условия проведения процесса сушки в распылительной сушилке.

The interactions of various factors affecting the process of drying the filtrate distillery dregs are investigated. Rational conditions for the process of drying the filtrate distillery dregs in a spray dryer are obtained.

Ключевые слова: оптимизация процесса сушки, фильтрат послеспиртовой барды, номограмма, кривые равных значений, уравнения регрессии, критерии оценки.

Утилизация послеспиртовой барды является важной задачей, актуальность которой рассмотрена многими исследователями. При этом решаются задачи рационального использования вторичных ресурсов и повышения экологической безопасности производства [1,2].

Одним из таких путей может быть использование фильтрата барды как отдельного продукта в процессе сушки. Для осуществления данного процесса предложено использовать распылительный тип сушки, при этом время сушки составляет 1,5-2 с, а в сочетании с невысокой температурой сушки, порядка 80 С, позволяет получить высококачественный порошкообразный продукт. Такой метод сушки не вызывает денатурацию белков, окисления и потерь витаминов, которыми богат фильтрат барды.

Для исследования взаимодействия различных факторов, влияющих на процесс сушки фильтрата послеспиртовой барды в распылительной сушилке, были применены математические методы планирования эксперимента [1]. Описание данного процесса может быть получено эмпирически. При этом его математическая модель имеет вид уравнения регрессии, найденного статистическими методами на основе экспериментов [2]. Математическая модель изучаемого процесса представляется в виде полинома второй степени:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{i \leq j}^n b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j$$

где b_0 – свободный член уравнения, равный средней величине отклика при условии, что рассматриваемые факторы находятся на средних, нулевых, уровнях;

X – масштабированные значения факторов, которые определяют функцию отклика и поддаются варьированию;

b_{ij} – коэффициенты двухфакторных взаимодействий, показывающие, насколько изменится степень влияния одного фактора при изменении величины другого;

b_{ii} – коэффициенты квадратичных эффектов, определяющие нелинейность выходного параметра от рассматриваемых факторов;

i, j – индексы факторов;

n – число факторов в матрице планирования.

В качестве основных факторов [3], влияющих на процесс сушки послеспиртовой барды, были выбраны:

X_1 – температура сушильного агента, °С;

X_2 – скорость сушильного агента, м/с;

X_3 – скорость вращения диска распылительной сушилки, м/с

X_4 – влажность сгущенного фильтрата барды, %.

Все эти факторы совместимы и некоррелируемы между собой. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1. Выбор интервалов изменения входных факторов обусловлен технологическими условиями процесса сушки послеспиртовой барды в распылительной сушилке и технико-экономическими показателями процесса.

Таблица 1

Пределы изменения входных параметров

Пределы изменения входных факторов	Кодированное значение	Значение факторов в точках плана			
		X_1 $T_B, \text{ }^\circ\text{C}$	X_2 $v_B, \text{ м/с}$	X_3 $v_d, \text{ м/с}$	X_4 $\omega, \text{ \%}$
Основной уровень	0	70	10	160	65
Интервал планирования	Δ	5	1	20	5
Верхний уровень	+1	75	11	180	70
Нижний уровень	-1	65	9	140	60
Верхняя "звездная точка"	+2	80	12	200	75
Нижняя "звездная точка"	-2	60	8	120	55

Критериями оценки влияния входных факторов на процесс сушки послеспиртовой барды были выбраны: Y_1 – удельные энергозатраты процесса сушки, к 1 кг испаренной влаги, кВт ч/кг; Y_2 – влагонапряжение сушильной камеры, кг/(м·с); Y_3 – влажность готового продукта, %.

$$Y_1 = 3,28 + 0,11 \cdot X_1 + 0,1 \cdot X_2 + 0,098 \cdot X_3 + 0,067 \cdot X_4 + 0,007 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,005 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,0112 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,0085 \cdot X_1^2 - 0,009 \cdot X_2^2 - 0,0065 \cdot X_3^2 - 0,014 \cdot X_4^2$$

$$Y_2 = 9,94 - 0,23 \cdot X_1 - 0,094 \cdot X_2 - 0,208 \cdot X_3 + 0,204 \cdot X_4 + 0,01 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,105 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,0112 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,0185 \cdot X_1^2 - 0,0048 \cdot X_2^2 - 0,0035 \cdot X_3^2 - 0,002 \cdot X_4^2 \quad (3)$$

$$Y_3 = 9,13 + 0,39 \cdot X_1 + 0,386 \cdot X_2 + 0,387 \cdot X_3 - 0,25 \cdot X_4 + 0,031 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,032 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,011 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,053 \cdot X_1^2 - 0,071 \cdot X_2^2 - 0,055 \cdot X_3^2 - 0,091 \cdot X_4^2$$

На рисунках 1-4 показаны кривые равных значений выходных параметров, которые представляют научный интерес, позволяют определять значения входных параметров в исследуемой области значений и прогнозировать возможные значения данных параметров вне её.

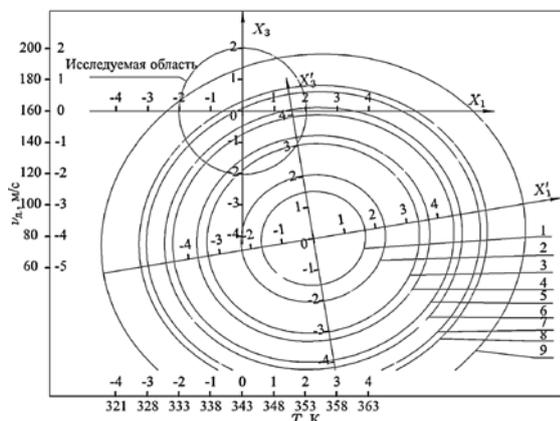


Рисунок 1 - Кривые равных значений удельных энергозатрат, Y_1 , кВт·ч/кг; от температуры сушильного агента, T , К и скорости вращения диска сушильной установки v_d , м/с

Выбор критериев оценки Y обусловлен их наибольшей значимостью для процесса сушки послеспиртовой барды. Так, Y_1 определяет энергоёмкость процесса и является важным показателем в оценке его энергетической эффективности, Y_2 определяет производительность процесса сушки и напрямую связан с его скоростью, Y_3 напрямую связан с качеством готового порошкообразного продукта.

Для исследования было применено центральное композиционное ротационное униформ-планирование и был выбран полный факторный эксперимент 2^4 [1]. При обработке результатов эксперимента были применены следующие статические критерии: проверка однородности дисперсий – критерий Кохрена, значимость коэффициентов уравнений регрессии – критерий Стьюдента, адекватность уравнений – критерий Фишера. В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие данный процесс под влиянием исследуемых факторов:

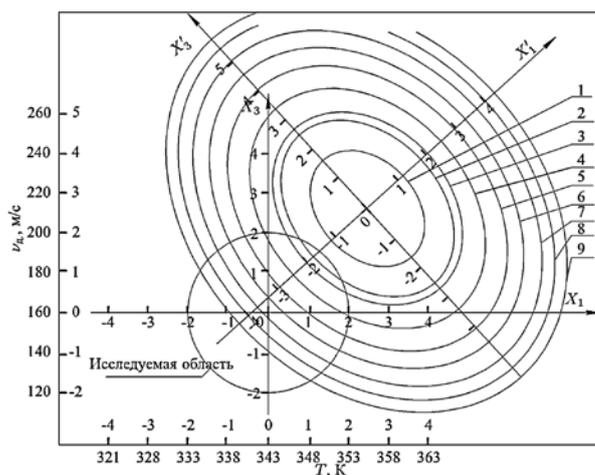


Рисунок 2 – Кривые равных значений влагонапряжения сушильной камеры, Y_2 , кг/м³·ч; от температуры сушильного агента, T , К и скорости вращения диска сушильной установки v_d , м/с

На рисунках 5-6 показаны номограммы для определения значений выходных параметров в исследуемой области значений.

Общая математическая постановка задачи оптимизации представлена в виде следующей модели:

$$q = q(Y_1, Y_2, Y_3) \rightarrow opt \text{ при } x \in D$$

Определим область значений:

$$D: Y_1(X_1, X_2, X_3, X_4) \rightarrow min$$

$$Y_2(X_1, X_2, X_3, X_4) \rightarrow max$$

$$Y_3(X_1, X_2, X_3, X_4) \rightarrow min$$

В таблице 2 сведены оптимальные интервалы изменения параметров X_i для всех исследуемых выходных факторов.

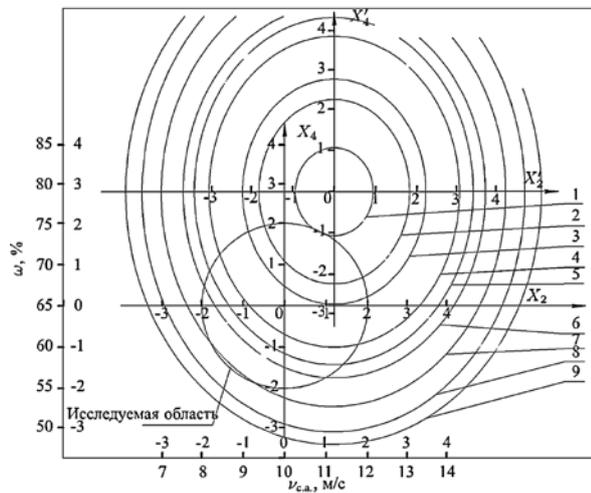


Рисунок 3 – Кривые равных значений влагонапряжения сушильной камеры, Y_2 , кг/м³·ч; от скорости сушильного агента $v_{с.а.}$, м/с и влажности упаренного фильтрата ω , %

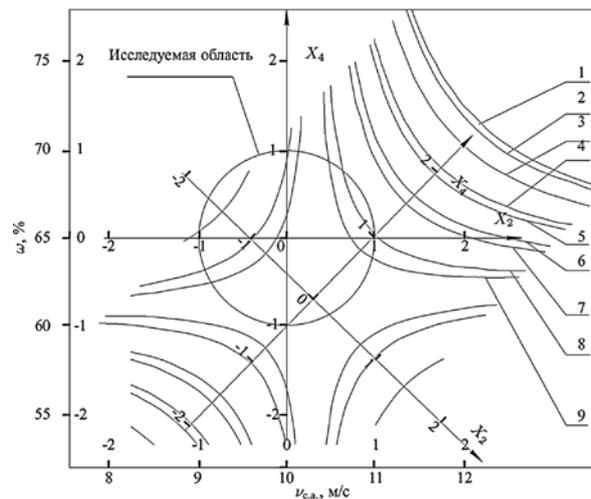


Рисунок 4 - Кривые равных значений влажности готового продукта, Y_3 , %; от скорости сушильного агента $v_{с.а.}$, м/с и влажности упаренного фильтрата ω , %

Согласно критерию оптимизации для принятия окончательного решения по выбору

оптимальных режимов исследуемого процесса необходимо решить компромиссную задачу, накладывая оптимальные (таблица 2) интервалы параметров X_i друг на друга.

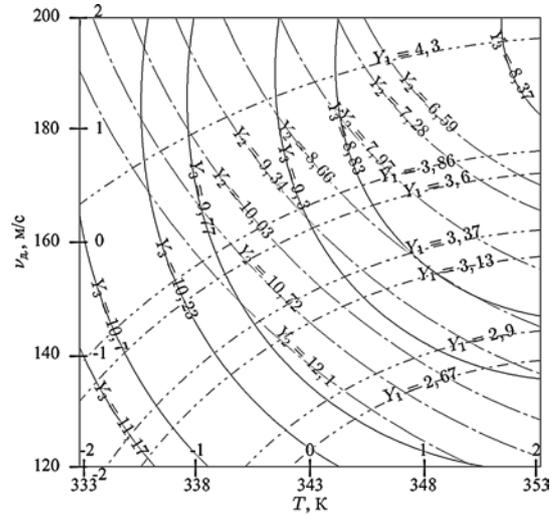


Рисунок 5 – Номограмма для определения значений удельных энергозатрат Y_1 , кВт·ч/кг и влажности готового продукта Y_3 , %

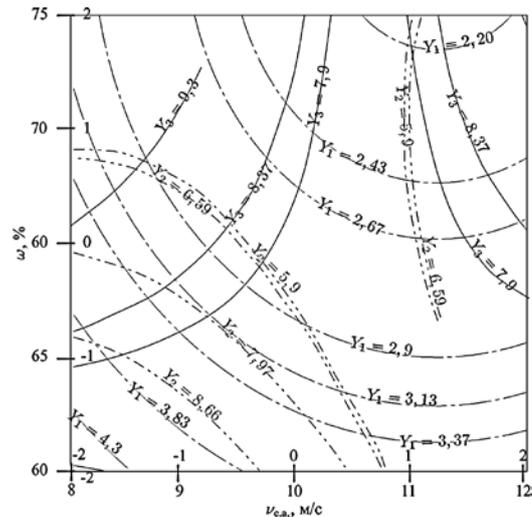


Рисунок 6 – Номограмма для определения значений энергозатрат Y_1 , кВт·ч/кг и влажности Y_3 , %

Таблица 2

Оптимальные интервалы параметров X_i

Y	$X_1, ^\circ\text{C}$		$X_2, \text{м/с}$		$X_3, \text{м/с}$		$X_4, \%$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
Y_1	60	65	8	9	120	140	55	62
Y_2	75	80	11	12	180	200	70	75
Y_3	77	80	10	11	11	200	57	65

В результате были получены рациональные значения интервалов входных факторов:

$$X_1 = 70 - 77 ^\circ\text{C};$$

$$X_2 = 9,5 - 11,5 \text{ м/с};$$

$$X_3 = 160 - 180 \text{ м/с};$$

$$X_4 = 58 - 68 \%$$

Для проверки правильности полученных результатов был поставлен ряд параллельных экспериментов, полученные результаты попадали в рассчитанные доверительные интервалы по всем критериям качества. При этом среднеквадратичная ошибка не превышала 5,2 %.

Разработанные математические модели сушки фильтра послеспиртовой барды могут быть использованы при конструкторской разработке технологии распылительной сушки и управляющей аппаратуры для сушилок.

Таким образом, решена задача оптимизации, которая позволила выделить рациональные интервалы изменения входных факторов по трем критериям посредством компьютерных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1 Кретов, И.Т. Технологическое оборудование предприятий бродильной промышленности [Текст] / И. Т. Кретов, С. Т. Антипов, Г. В. Агафонов. - Воронеж: Издательство государственного университета, 2011. - 586 с.

2 Журавлев, А. В. Совершенствование процесса сушки послеспиртовой зерновой барды в аппарате с закрученным потоком теплоносителя [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.18.12. - Воронеж, 2006.

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

4 Грачев, Ю. П. Моделирование и оптимизация тепло- и массообменных процессов пищевых производств [Текст] / Ю.П. Грачев, А.К. Тубольцев. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. - 215 с.

5 Шевцов, А. А. Выбор рациональных параметров премиксов с содержанием холинхлорида [Текст] / А.А. Шевцов, Е.С. Шевцова, А.В. Дранников, А.А. Дерканосова и др. // Известия Вузов. - 2009. - № 5,6. - С. 68-71.

REFERENCE

1 Kretov, I.T. Technological equipment companies fermentation industry [Text] / I.T. Kretov, S.T. Antipov, G.V. Agafonov. - Voronezh State University Publishing House, 2011. - 586 p.

2 Zhuravlev, A.V. Improvement drying process distillery grains wastes in the device with twisted coolant flow [Text]: diss. ... PhD: 05.18.12. - Voronezh, 2006.

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

4 Grachev, U.P. Modelling and optimization of heat and mass transfer processes of food production [Text] / U.P. Grachev, A.K. Tuboltsev. - M.: Legkaya & pischevaya, 1984. - 215 p.

5 Shevtsov, A.A. Choice of rational parameters with premix containing choline chloride [Text] / A.A. Shevtsov, E.S. Shevtsova, A.V. Drannikov, A.A. Derkanosova et al // Proceedings of Higher Education. - 2009. - № 5,6. - P. 68-71.