

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ДРОБЛЕНИЯ СЕМЯН ХЛОПЧАТНИКА МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Юсупов Фирнафас

к.т.н., доцент. ТУИТ им. Мухаммада ал-Хорезми, Ургенчский филиал.

Атаханов Мухаммаджон Фахриддин ўғли

ТУИТ им. Мухаммада ал-Хорезми, Ургенчский филиал, магистрант 2-курса

Бердимуратов Умид Рустамбоевич

ТУИТ им. Мухаммада ал-Хорезми, Ургенчский филиал, магистрант 2-курса

<https://doi.org/10.5281/zenodo.6793123>

**Аннотация.** Целью данной работы является экспериментально-статистическое исследование технологического процесса дробления семян хлопчатника а также построение упрощенных статистических линейных моделей исследуемых процессов методом планирования эксперимента

**Ключевые слова.** Технологический процесс, дробление семян хлопчатника, планирование эксперимента, трех факторный модель, анализ модели.

**Annotation.** The purpose of this work is an experimental and statistical study of the technological process of crushing cotton seeds, as well as the construction of simplified statistical linear models of the processes under study by the method of experiment planning.

**Keywords.** Technological process, cotton seed crushing, experiment design, three-factor model, model analysis.

Производимой продукцией подготовительного цеха маслоэкстракционного завода, состоящего из склада семян, семеочистительного, шелушильно-сепараторного цехов и вальцевого отделения, является мяЗтка хлопковая.

Мятка хлопковая – это продукт, полученный при измельчении на вальцевых станках ядра семян хлопчатника. Измельчение ядра семян хлопчатника производится с целью достижения максимально возможного вскрытия клеток ядра семян хлопчатника.



При обрушивании (шелушении) семян хлопчатника получается рушанка, состоящая из смеси ядра, шелухи и целых семян. Процесс сепарирования рушанки имеет цель получения ядра с минимальным содержанием шелухи с наименьшей масличностью.

Количество целых семян (целяка) в рушанке после первого обрушивания (шелушения) должно быть не более 30 %, после второго – не более 0,8 %. При разделении (сепарировании) рушанки образуются две фракции – шелуховая и ядровая.

Ядро семян хлопчатника является продуктом, который подлежит дальнейшей переработке для извлечения из него масла, поэтому длительное хранение его не рекомендуется, так как оно лишено оболочки и в нем быстро идет нарастание кислотного числа масла, наблюдаются разрушительные процессы, приводящие к потерям масла и сокращению его выхода.

Массовая доля ядра в семени хлопчатника составляет 35-71 % в зависимости от селекционного и промышленного сортов. Если массовая доля жирного масла в семени составляет 12,0 – 25,0, то в ядре 32,76 – 40,86 %. Влажность ядра находится в пределах 5,02 – 6,80 % в обезжиренном ядре семян хлопчатника содержание протеина составляет 50,17 – 61,87 % [1].

Разрабатываются упрощенные математические модели технологического процесса дробления семян хлопчатника методом планирования эксперимента с целью их использования для оперативного управления ходом производства. Технологический процесс дробления семян хлопчатника маслоэкстракционного производства, является сложным комплексом, состоящим из некоторого множества технологических установок (оборудования), приборов контроля и регулирования, складов различных видов исходного сырья (модификации хлопковых семян: селекционный сорт семян хлопчатника, промышленный сорт, вид сбора, сортность хлопковых семян, засоренность, влажность и т.д.) и промежуточных продуктов, полуфабрикатов (ядро семян хлопчатника, шелуха, недробленые семена и т.д.).



Входом технологических оборудований является множества модификаций исходного продукта семян хлопчатника различных видов сбора и сортов. Выходом является множества промежуточных продуктов – ядро семени, шелуха, недробленные семена и т.д. Основными материальными потоками на исследуемом объекте с непрерывным технологическим процессом являются потоки исходного сырья; семена хлопчатника, ядро семян хлопчатника, шелуха, недробленные семена, производственные отходы и т.д..

Рассматриваемый непрерывный технологический процесс является многоступенчатым процессом с последовательной структурой. Известно, что сложность математической модели объекта управления определяется количеством структурных элементов и конфигурацией связей между ними.

Технологический процесс дробления семян хлопчатника состоит из следующих основных технологических операций: разрыхления семян, транспортер, сушка, очистка, дробления, шелушение семени, сито различных размеров [1].

Целью данной работы является экспериментально-статистическое исследование технологического процесса дробления семян хлопчатника а также построение упрощенных статистических линейных моделей исследуемых процессов методом планирования эксперимента, для оперативного управления им, хотя все исследования, связанные с определением модели и её анализом, безусловно, могут быть применены и для других задач по изучению данного процесса.

Статистическое обследование технологического процессом дробления хлопковых семян требует также предварительной оценки необходимого числа наблюдений. Количество необходимых статистических данных можно определить согласно методики, изложенной в [2-5].

Согласно рассмотренной методики сбора экспериментальных данных в условиях нормального функционирования технологического процесса дробления семян хлопчатника регистрировались параметры процессов дробления с учетом временных

сдвигов и интервала съема данных, рассчитанных по результатам предварительного эксперимента.

Весь собранный статистический материал представлен в виде таблиц исходных данных (табл.1 и 2).

Полученные экспериментальные данные явились приближенным эквивалентом объекта и применялись при математическом моделировании технологического процесса дробления семян хлопчатника методом планирование эксперимента.

Исходя из анализа существующих методов построения моделей сложных динамических объектов, для технологического процесса наиболее приемлемы экспериментально-статистические методы идентификации, основанные на методах корреляционного и регрессионного анализа [2,3,4].

При относительно невысокой корреляции входных переменных и наличии некоторой априорной информации о степени и характере связи между переменным процесса одним из эффективных способов построения регрессионных моделей является метод планирование эксперимента [2,4,5].

Построению математической модели, объективно отражающей основные черты исследуемого реального процесса, предшествует задача его формализации, заключающаяся в выявлении, классификации основных параметров процесса и установлении системы параметров, определяющей процесс.

Предварительное изучение процессов дробления семян хлопчатника, а также анализ априорной информации о процессах, содержащихся в практическом опыте технологов и специалистов, позволили выделить технологические параметры, сказывающие наибольшее влияние на ход процесса дробления семян хлопчатника.

Всю совокупность параметров определяющих текущее состояние технологического процесса дробления семян хлопчатника можно разбить на две группы параметров [4].

I. Совокупность первичных (входных) параметров процесса, характеризующих качества и количество исходных процессов:

а) входные параметры исходного сырья семян хлопчатника для процесса дробления  $X=\{x_1, x_2, x_3\}$ ,

где  $x_1$  - засоренность семян хлопчатника, в %;

$x_2$  - поврежденность семян хлопчатника, в %;

$x_3$  - влажность семян хлопчатника, в %.

б) Совокупность вторичных (выходных) параметров процесса, характеризующих те обобщенные технико-экономические показатели, которыми оцениваются качества и экономическая эффективность работы технологического процесса дробления хлопковых семян  $Y=\{y_1, y_2, y_3\}$ ,

где  $y_1$  – выход ядро семян хлопчатника (дробленые семена), в %;

$y_2$  – выход шелухи, косточки семян хлопчатника, в %;

$y_3$  - недробленные семена хлопчатника, в %.

Уровни факторов  $X=\{x_1, x_2, x_3\}$  выбирались таким образом, чтобы они охватывали предполагаемую область оптимальных значений факторов, что следует из табл. 1.

Таблица 1.

Уровни Факторов	Обозначение	в %	в %	в %
		$x_1$	$x_2$	$x_3$
Основной	0	6	7	11
Интервал варьирования	$\Delta x$	4	5	3
Верхний	+1	10	12	14
Нижний	- 1	2	2	8

Эксперименты и дальнейшая обработка их результатов проводилась в соответствии с методикой полного факторного эксперимента. В каждой точке факторного пространства опыты повторялись по 3 раза. Построение модели производим для одного фактора оптимизации. Результаты измерений входных и выходных факторов в процентах приведены в табл.2.

Матрица планирования  $2^3$ . Таблица 2.

Действительные значение факторов				Координаты факторов в единицы измерения				Выход
Номер эксперимента	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$z_0$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$y_1$
1	2	2	8	+1	-1	-1	-1	75
2	10	2	8	+1	+1	-1	-1	70
3	2	12	8	+1	-1	+1	-1	73
4	10	12	8	+1	+1	+1	-1	68
5	2	2	14	+1	-1	-1	+1	71
6	10	2	14	+1	+1	-1	+1	66
7	2	12	14	+1	-1	+1	+1	68
8	10	12	14	+1	+1	+1	+1	65

Устанавливаем вид анализируемой функции или математическая модель объекта исследования. В простейшем случае для полно факторного эксперимента типа  $2^3$  выбирают полином первого порядка, линейный по всем переменным:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3 + b_{12} z_1 z_2 + b_{13} z_1 z_3 + b_{23} z_2 z_3 + b_{123} z_1 z_2 z_3 \quad (4)$$

где  $z_1, z_2, z_3$  — кодированные значения факторов;  $b_0$  — свободный член;  $b_1, b_2, b_3$  — коэффициенты, показывающие степень влияния каждого фактора на параметр оптимизации;  $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  — коэффициенты, показывающие степень влияния взаимодействия соответствующих факторов на параметр оптимизации.

Обработка результатов экспериментов заключается в статистическом анализе и включает следующие этапы.

Подсчитываем средние значения показателей  $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$  в каждой строке матрицы планирования (столбцы  $y_1, y_2, y_3$ ), для этого в каждой строке матрицы планирования проводится дополнительные эксперименты  $m$  раз:

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m y_{ji}}{m}. \quad \bar{y}_1 = 74,333, \quad \bar{y}_2 = 71,0, \quad \bar{y}_3 = 72,667, \quad \bar{y}_4 = 68,0, \\ \bar{y}_5 = 71,0, \quad \bar{y}_6 = 66,0, \quad \bar{y}_7 = 67,0, \quad \bar{y}_8 = 65,0.$$

Затем построчные дисперсии рассчитывается по формуле

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{m-1}. \quad s_1^2 = 0,3334, \quad s_2^2 = 1,0, \quad s_3^2 = 0,5, \quad s_4^2 = 1,0, \\ s_5^2 = 1,0, \quad s_6^2 = 1,0, \quad s_7^2 = 1,0, \quad s_8^2 = 1,0.$$

Далее вычисляется экспериментальное значение критерия Кохрена, т. е. отношение максимальной  $s_i^2$  из  $N$  дисперсий к сумме всех дисперсий по формуле:

$$\sigma_{расч} = \frac{s_{i\max}^2}{\sum_{i=1}^n s_i^2}. \quad \sigma_{расч} = 0,1463.$$

При  $f_1 = m-1$  и  $f_2 = n$  из справочных таблиц [2] значение  $\sigma_{табл}$  было принято равным 0,5457. Так как  $\sigma_{расч} < \sigma_{табл}$ , то построчные дисперсии следует считать однородными, а воспроизводимость эксперимента — удовлетворительной.

Дисперсия параметра оптимизации в соответствии с формулой равна:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n s_i^2}{n}. \quad s_y^2 = 0,8542, \quad s_y = 0,9242.$$

По соответствующим формулам были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_{ji} y_i, \quad j = \overline{0, k}, \quad k = 3. \quad b_{12} = \frac{1}{N} \sum (z_1 z_2)_i y_i; \quad b_{13} = \frac{1}{N} \sum (z_1 z_3)_i y_i$$

$$b_{23} = \frac{1}{N} \sum (z_2 z_3)_i y_i; \quad b_{123} = \frac{1}{N} \sum (z_1 z_2 z_3)_i y_i.$$

$$b_0 = 69,5, \quad b_1 = -2,25, \quad b_2 = -1,0, \quad b_3 = -2,0, \quad b_{12} = 0,25, \quad b_{13} = 0,25, \quad b_{23} = 0, \quad b_{123} = 0,25.$$

Уравнения регрессии приняло вид

$$\hat{y} = 69,5 - 2,25z_1 - z_2 - 2z_3 + 0,25z_1z_2 + 0,25z_1z_3 + 0,25z_1z_2z_3 \quad (5)$$

Дисперсия коэффициентов уравнения регрессии в соответствии с формулой составила:

$$s_{b_j} = \frac{s_y}{\sqrt{NM}}, \quad s_{b_j} = 0,1887.$$

Экспериментальное значение критерия Стьюдента равно:

$$t_j = \frac{|b_j|}{s_{b_j}}. \quad t_{p_0} = 368,31, \quad t_{p_1} = 11,92, \quad t_{p_2} = 5,30, \quad t_{p_3} = 10,60, \quad t_{p_{12}} = 1,33,$$

$$t_{p_{13}} = 1,33, \quad t_{p_{23}} = 0,0, \quad t_{p_{123}} = 1,33.$$

При  $f_1 = n(m-1) = 16$  и  $\alpha = 0,05$  табличное значение  $t_{табл} = 1,746$  при числе степеней свободы, равном 16 [2]. Сравнение  $t_{рас}$  с  $t_{табл}$  показало, что статистически значимыми являются только коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3$ . Поэтому окончательно уравнение регрессии имеет вид:



$$\hat{y} = 69.5 - 2.25z_1 - z_2 - 2z_3 \quad (6)$$

Проверка адекватности модели, т.е. пригодность полученной модели для описания реального объекта исследования, по отношению дисперсий адекватности и параметра оптимизации. Дисперсия адекватности рассчитываем по формуле

$$s_{ad}^2 = \frac{m \sum_{j=1}^m \left( \bar{y}_j - \hat{y}_j \right)^2}{n - q}, \text{ где } q - \text{ число членов уравнения регрессии, оставшихся после}$$

проверки значимости коэффициентов  $b_j$ ;  $\hat{y}_j$  - — построчные значения параметра оптимизации, вычисленные по окончательному виду математической модели.  $s_{ad}^2 = 1.9183$ .

Для проверки адекватности окончательно принятой математической модели (3) был произведен расчет критерия Фишера по формуле

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, F_{расч} = 2.24$$

При  $f_1 = n - q = 4$ ,  $f_2 = n(m-1) = 16$  и  $\alpha = 0,05$  табличное значение  $F_{табл} = 3,007$  [2]. Так как  $F_{расч} < F_{табл}$ , то можно считать, что уравнение (6) адекватно описывает технологический процесс дробления семени хлопчатника. Из этого уравнения следует, что на параметр  $y_1$  существенное влияние оказывает лишь коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_3$ . Коэффициенты  $b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$  на технологический процесс в исследуемых интервалах на показатель  $y_1$  заметного влияния не оказывают.

Полученные результаты могут быть применены: а) для выбора оптимального технологического режима; б) при машинной имитации с целью проверки и оценке алгоритмов управления технологическим процессом дробления хлопковых семян, а также для создания систему управления процессом; в) для выбора эффективного плана



основного производственного процесса переработки хлопковых семян на основе упрощенных линейных математических моделей.

#### Литература:

1. Производственный технологический регламент. На производство хлопковой мятки по схеме двукратного шелушения-сепарирования и измельчения ядра производительностью 800 т/сутки хлопковых семян. ТР 1602-28-12-08. Ташкент, 2008. – 93 с.
2. Реброва И.А. Планирование эксперимента: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2010. – 105 с.
3. Рыков В.В., Иткин В.Ю. Математическая статистика и планирование эксперимента. М.: РГУНГ им. Губкина, 2009. – 303 с.
4. Основы планирования научно-исследовательского эксперимента/ М. Аугамбаев, А.З. Иванов, Ю.И. Терехов; под ред. Г.М. Рудакова. – Ташкент: Укитувчи, 2004. – 336 с.
5. Юсупов Ф., Алиев О.А. Разработка модели оптимального планирования и управления производственным процессом первичной переработки хлопка в среде Linprog Matlab//EUROPEAN SCIENTIFIC CONFERENCE. Сборник статей XIV международной научно-практической конференции. Пенза. МЦНС. Наука и просвещение. – 2019. – с. 121-123.