

*Керимов Мухтар Ахмиевич*<sup>1</sup>,  
д-р техн. наук, профессор, профессор;  
*Керимов Мовсар Мухтарович*<sup>2</sup>,  
студент

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕРНОСУШИЛОК

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,  
Санкт-Петербург, Россия  
<sup>1</sup> martan-rs@yandex.ru

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),  
Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup> brutus95brutus@gmail.com

**Аннотация.** Лимитирующим участком поточной технологической линии послеуборочной обработки зерна является зерновая сушилка. От эффективности её работы зависят темпы проведения уборочных работ и качество функционирования зерноуборочного комплекса в целом.

Многочисленные исследования в рассматриваемой предметной области позволяют сформулировать основные группы задач, которые возникают при эксплуатации зерносушилок.

Первая группа: определение путей усовершенствования конструкции зерновой сушилки, обеспечивающих повышение эффективности ее работы с учетом установленных ограничений.

Вторая группа: определение условий, обеспечивающих максимальную эффективность функционирования зерносушилки при заданных агротехнических допусках.

Основное требование, предъявляемое к конструкции сушилки – обеспечить равномерное воздействие теплоносителя на весь объем зерна. Решение первой группы задач связано с рационализацией конструктивных параметров зерносушилки, а также предусматривает интенсификацию рабочих процессов действующих установок. Вторая группа содержит задачи оптимизации режимных параметров зерносушилок, которые связаны с проблемой управления технологическими процессами.

При анализе режимов функционирования зерновых сушилок оценивается влияние управляющих параметров на различные показатели эффективности. В частности, для оптимизации технологических режимов важно получить траекторию, которую описывает вектор выходных параметров при изменении вектора входных переменных.

Важным этапом в решении задачи оптимизации режимов работы и рационализации конструктивных параметров зерносушилки является разработка ее математической модели и формирование системы ограничений.

**Ключевые слова:** зерносушилка, технологическая надежность, оптимизация, математическая модель, управление, системный подход.

*Mukhtar A. Kerimov*<sup>1</sup>,  
Doctor of Technical Sciences, Professor;  
*Movsar M. Kerimov*<sup>2</sup>,  
Student

## DEFINITION OF TECHNOLOGICAL TOLERANCES ON INDICATORS OF FUNCTIONING OF GRAIN DRYERS

<sup>1</sup> St. Petersburg State Agrarian University,  
Saint Petersburg, Russia,  
martan-rs@yandex.ru

<sup>2</sup> Saint Petersburg State Electrotechnical University “LETI”,  
Saint Petersburg, Russia,  
brutus95brutus@gmail.com

**Abstract.** The limiting section of the production line for post-harvest grain processing is a grain dryer. The pace of harvesting and the quality of the functioning of the grain complex as a whole depend on the effectiveness of its work.

Numerous studies in this subject area allow us to formulate the main groups of problems that arise during the operation of grain dryers.

The first group: identifying ways to improve the design of the grain dryer, providing an increase in the efficiency of its work, taking into account the established restrictions.

The second group: determination of the conditions ensuring the maximum efficiency of the functioning of the grain dryer for given agrotechnical tolerances.

The main requirement for the design of the dryer is to ensure uniform exposure to the coolant on the entire grain volume. The solution to the first group of problems is related to the rationalization of the design parameters of the grain dryer, and also provides for the intensification of the working processes of existing plants. The second group contains the tasks of optimizing the operational parameters of grain dryers, which are associated with the problem of process control.

When analyzing the functioning modes of grain dryers, the influence of control parameters on various performance indicators is evaluated. In particular, for optimizing the technological modes, it is important to obtain the trajectory that the vector of output parameters describes when the vector of input variables changes.

An important step in solving the problem of optimizing operating modes and rationalizing the design parameters of a grain dryer is the development of its mathematical model and the formation of a system of restrictions.

**Keywords:** grain dryer, technological reliability, optimization, mathematical model, management, systematic approach.

### Введение

Эффективность функционирования зерновых сушилок зависит от их технологической надежности. Технологическую надежность необходимо рассматривать как качество, развернутое во времени, т. е. представляет собой функционирование технологического процесса сушки зерна в заданном режиме в течение определенного времени [1].

При этом возможны также отклонения хода технологического процесса от заданного режима. Эти отклонения интерпретируются как выбросы. Как и любой случайный процесс, выбросы характеризуются длительностью, количеством, положительными или отрицательными значениями [2].

Область значений показателя качества, которая характеризует функционирование технологического процесса в заданном режиме, определяется своими границами – агротехническими допусками. В качестве критериев оптимальности процесса сушки целесообразно рассматривать минимальные значения отклонений температуры в сушилке и влажности зерна на выходе из сушилки, т. е.  $\min(\Theta_C - \Theta_3)$  и  $\min(W_C - W_K)$ . Из указанной постановки следует, что для оценки надежности функционирования зерносушилки необходимо использовать двухпараметрическую модель.

### **1. Материал и методы**

Задача определения допусков на показатели качества технологического процесса сушки является сложной, при решении которой следует учитывать цели и критерии более высоких иерархических уровней. Поэтому назначение допусков на показатели качества в такой постановке необходимо осуществлять по критерию минимума затрат. Соответственно, для других типов сушилок найденные значения допусков могут быть неоптимальными.

Обобщенным показателем качества уборочно-транспортной системы принята вероятность выполнения технологических операций в заданные агротехнические сроки, например,  $P(0,75)$ . Указанное значение вероятности означает, что лишь 75 % всех объемов механизированных работ по уборке и послеуборочной обработке зерна выполняется с соблюдением оптимальных агротехнических сроков. Предполагается, что допуски на этот показатель качества установлены верхним уровнем иерархической системы. Совокупность их значений будет формировать область ограничений для решаемой задачи установления допусков на параметры функционирования технологического процесса сушки – длительность, количество выбросов и др. [3].

Проведем дальнейшую конкретизацию решаемой задачи. В соответствии с установленными допусками технологический процесс будет осуществляться в режиме «оптимально» или «неоптимально». Необходимо, следовательно, определить допуски на параметры, при которых обеспечивается условие функционирования в режиме «оптимально». Такая постановка позволяет решать задачу установления рациональных параметров как самой сушилки, так и проектирования рациональных вариантов зерноуборочных комплексов в целом.

## 2. Результаты и обсуждение

Экспериментальными исследованиями установлено, что зависимость обобщенного показателя качества системы от параметров носит нелинейный характер [1].

При случайном характере изменения параметров технологического процесса сушки зерна и значений показателя качества функционирования системы задача становится практически неразрешимой. Поэтому определение допусков на параметры процесса сушки необходимо осуществлять при фиксированных значениях показателя качества.

Количество параметров, которые характеризуют эффективность функционирования технологического процесса в зерновых сушилках, в общем случае может быть несколько, например, восемь.

Для инженерно-статистического анализа процесса функционирования сушилки представим всю совокупность указанных факторов в виде многомерного пара метра:

$$x = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}.$$

Соответственно, установленный многомерный допуск будет равен:

$$\Delta = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_M\}.$$

Функция плотности распределения многомерного параметра описывается формулой [4]:

$$f(x) = \frac{\sqrt{|\sigma^{nk}|}}{\sqrt{(2\pi)^p}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{n,k=1}^P \sigma^{nk} (x_z - \mu_z)(x_k - \mu_k)\right\}, \quad (1)$$

где  $P$  – число параметров;

$|\sigma^{nk}|$  – матрица, обратная матрице ковариаций параметров;

$\mu_z, \mu_k$  – средние значения параметров  $x_z$  и  $x_k$ .

Матрица ковариаций  $\Sigma = \{\sigma_{kn}\}$  характеризует взаимосвязь между отдельными составляющими многомерной случайной величины. В том случае, когда матрица ковариаций диагональная, указанные факторы являются независимыми. Тогда плотность многомерного распределения может быть получена путем умножения плотностей распределений факторов, поскольку справедливо выражение:

$$\sigma^{kk} = \frac{1}{\sigma_{kk}}$$

С учетом последнего соотношения формулу (1) перепишем в следующем виде:

$$f(x) = \prod_{k=\sigma_{kk}}^P \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x_k - \mu_k)^2}{2\sigma_{kk}}\right\}. \quad (2)$$

Обращение матрицы невозможно в том случае, когда отдельные факторы являются зависимыми между собой, т. е. при

$$x_k^j = \sum_{Z=1}^c a_{kz} f_z^j + \xi_k^j, \quad (3)$$

где  $a_{zk}$  – коэффициент веса главного фактора;

$f_z^j$  – независимый по  $z$  главный фактор;

$\xi_k^j$  – независимая по  $k$  случайная величина.

По значениям коэффициентов  $a_{zk}$  можно восстановить значения всех факторов. Эти коэффициенты образуют матрицу  $A$ .

Методика обоснования минимального числа главных факторов и выбора базисных параметров, характеризующих технологическую надежность зерновой сушилки, заключается в преобразовании матрицы ковариаций  $\Omega$  к треугольному виду методом Гаусса. Согласно этому методу после  $P$  шагов матрица становится треугольной.

Приведенная методика справедлива лишь тогда, когда параметры  $x_k^j$  имеют нормальное распределение. Для конкретного решения задачи ограничимся двухпараметрической моделью. В качестве таких параметров приняты функции, характеризующие:

– отклонение температуры теплоносителя в сушилке от заданной величины,

$$m(t) = m\{\Theta_c, \Theta_3\} \quad (4)$$

– отклонение значения влажности зерна на выходе из сушилки от кондиционной величины,

$$b(t) = b\{W_c, W_3\}. \quad (5)$$

Для определения вероятностных характеристик выбросов и построения области допустимых значений  $O$  функций представим их в виде двумерного векторного процесса:

$$K(t) = \{m(t), b(t), t \in T\}, \quad (6)$$

составляющими которого являются непрерывные и дифференцируемые случайные функции времени  $b(t)$  и  $m(t)$ ,  $t \in [t_0, t_0 + T]$ . Значения вектора  $K(t)$  изменяются на вещественной оси, т. е.  $K(t) \in (-\infty, \infty)$ .

Границы области допустимых значений  $O$  определяются из условия:

$$m(t) \in [-\Theta, \Theta]; b(t) \in [-W, W]. \quad (7)$$

Выходы траектории двумерного процесса  $K(t)$  за пределы области  $O$  являются следствием выхода функции  $b(t)$  за пределы ограничений  $\pm W$  при условии, что вторая функция  $m(t)$  остается в границах  $[-\Theta, \Theta]$ . Аналогичным является механизм выхода функции  $m(t)$  за пределы ограничений  $\pm\Theta$  при условии, что функция  $b(t)$  остается в границах  $[-W, W]$ . Тогда среднее число выбросов рассматриваемого двумерного случайного процесса из заданной области определится по формуле:

$$N_{k(t)}(O, T) = [N_W^+(W, T) + N_W^-(-W, T)] \cdot P\{m(t) \in [-\Theta, \Theta]\} + [N_0^+(\Theta, T) + N_0^-(-\Theta, T)] \cdot P\{b(t) \in [-W, W]\}, \quad (8)$$

где  $N_W^\pm(W, T)$  – количество положительных или отрицательных выбросов одномерного процесса  $b(t)$  за пределы границы ( $\pm W$ ) на интервале  $[t_0, t_0 + T]$ ;

$N^\pm(\pm\Theta, T)$  – количество выбросов (положительных или отрицательных) одномерного процесса  $m(t)$  за пределы границы ( $\pm\Theta$ ) на интервале  $[t_0, t_0 + T]$ .

Если траектория двумерного процесса  $k(t)$  не выходит за пределы области ограничений  $O$ , то выполняются следующие условия:

$$\left. \begin{array}{l} b(t) \in [-W, W]; \\ m(t) \in [-\Theta, \Theta]. \end{array} \right\} \quad (9)$$

Тогда можно вычислить среднее значение относительной длительности пребывания векторного процесса  $k(t)$  в области допустимых значений по следующему выражению:

$$T_{k(t)}(O) = P\{k(t) \in O\} = P\{b(t) \in [-W, W], m(t) \in [-\Theta, \Theta]\}. \quad (10)$$

Зная характеристики

$N_{k(t)}(O, T)$  и  $T_{k(t)}(O)$ , определим среднюю длительность выброса  $k(t)$  из заданной области:

$$T_{k(t)}(O) = \frac{1 - P\{k(t) \in O\}}{T^{-1} N_{k(t)}(O, T)} = \frac{1 - T_{k(t)}(O)}{T^{-1} N_{k(t)}(O, T)}. \quad (11)$$

Учитывая, что функции  $b(t)$  и  $m(t)$  являются независимыми и стационарными, вычислим вероятности  $P\{k(t)\}$ .

$$P\{k(t) \in [-W, -\Theta]\} = \int_{-(W, \Theta)}^{(W, \Theta)} P(\xi_k) d\xi_k, \quad (12)$$

$$P\{b(t) \in [-W, W], m(t) \in [-\Theta, \Theta]\} = \int_{-W}^W P(b) db \int_{-\Theta}^{\Theta} P(m) dm. \quad (13)$$

Найдем среднее число выбросов:

$$N^+(W, T) = T \int_0^{\infty} K_W^1 P(W, K_W^1) dK_W^1, \quad (14)$$

$$N^+(\Theta, T) = T \int_0^{\infty} K_{\Theta}^1 P(\Theta, K_{\Theta}^1) dK_{\Theta}^1, \quad (15)$$

$$N^-(-W, T) = -T \int_{-\infty}^0 K_W^1 P(-W, K_W^1) dK_W^1, \quad (16)$$

$$N^-(-\Theta, T) = -T \int_{-\infty}^0 K_{\Theta}^1 P(-\Theta, K_{\Theta}^1) dK_{\Theta}^1, \quad (17)$$

где  $P[b(t)]$  – одномерная плотность вероятности процесса  $b(t)$ ;

$P[m(t)]$  – одномерная плотность вероятности процесса  $m(t)$ ;

$P(\pm W, K_W^1)$  – совместная плотность вероятности  $P(K_W, K_W^1)$  для значения составляющей  $K_W$  и её производной в один и тот же момент времени;

$P(\pm \Theta, K_{\Theta}^1)$  – совместная плотность вероятности  $P(K_{\Theta}, K_{\Theta}^1)$  для значения составляющей  $K_{\Theta}$  и её производной в один и тот же момент времени.

Вероятность функционирования сушилки в заданном режиме в течение определенного времени  $\tau$  рассчитывается по формуле [5]:

$$P(Q_{\tau} \geq Q_3) = \int_{Q_3}^1 f(q) dq, \quad (18)$$

где  $Q_{\tau}$  – оценка показателя качества в момент  $\tau$ ;

$Q_3$  – заданная оценка качества функционирования зерновой сушилки;

$f(q)$  – плотность вероятности оценки показателя качества в момент  $\tau$ .

Значение плотности вероятности можно определить по формуле:

$$f(q_{\tau}) = \frac{1}{[1 - q(\tau)] \sqrt{2\pi D(\tau)}} \cdot \exp\left\{-\frac{[\log(1 - q(\tau) - m(\tau))]^2}{2D(\tau)}\right\}, \quad (19)$$

где  $m(\tau) = M[\log(1 - Q(\tau))]$  – математическое ожидание;

$D(\tau) = M[\log(1 - Q(\tau) - m(\tau))^2]$  – дисперсия.

Величина  $Q(\tau)$  представляет собой прогнозируемую оценку показателя качества.

С учетом соотношения (18) формулу для вычисления вероятности можно записать в окончательном виде:

$$P\{Q_\tau \geq Q_3\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D(r)}} \int_{Q_3}^1 \frac{1}{[1-q(\tau)]} \exp\left\{-\frac{[\log(1-q(\tau)-m(\tau))]^2}{2D(\tau)}\right\}. \quad (20)$$

### **Заключение**

1. Оценку качества функционирования технологических процессов зерновых сушилок необходимо проводить на основе разработанной математической модели, управляемыми параметрами в которой приняты критерии, характеризующие допустимый уровень значений температурного поля внутри сушилки и отклонение показателя влажности зерна от кондиционной величины на выходе из сушилки.

2. Математическая модель позволяет совершенствовать методику обоснования конструктивных и технологических параметров зерновой сушилки за счет использования процедур допускового контроля обобщенного показателя качества ее функционирования – двумерной случайной функции и применения компьютерных технологий.

3. Технологической надежностью зерноуборочных комплексов можно управлять путем резервирования производственных мощностей, что дает системе возможность адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования.

На объектном уровне эта задача решается обеспечением нормативной надежности отдельных технических средств за счет минимизации затрат на создание резерва производительности.

На системном уровне обеспечения функционирования технической оснащённости в зоне адаптационного максимума достигается созданием резерва производительности путем оптимизации эксплуатационных затрат.

### **Список литературы**

1. Керимов М. А. Оценка условий и качества функционирования зерновых сушилок // В кн.: Автоматизация процессов послеуборочной обработки зерна. Л.: 1985. С. 70–74.
2. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике. М.: Радио и связь, 1984. 288 с.
3. Керимов М. А., Хлудова М. В. Инструментарий для прогнозирования параметров функционирования технологических систем // В кн.: Фундаментальные исследования в технических университетах (материалы научно-технической конференции, СПбГТУ, 25-26 июня 1998 года). СПб, 1988. С. 94
4. Ильичев А. В., Грушанский В. А. Эффективность адаптивных систем. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
5. Арифи А., Эйзен С. Статистический анализ. М.: Мир, 1982. 488 с.