



УДК 534.111.:63

И.Я. Федоренко, Р.А. Котов  
I.Ya. Fedorenko, R.A. Kotov

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВИБРОСМЕШИВАНИЯ В СМЕСИТЕЛЕ С ГИБКИМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

### THE OPTIMIZATION OF VIBRO-MIXING PROCESS PARAMETERS IN A MIXER WITH FLEXIBLE WORKING TOOL

**Ключевые слова:** оптимизация, процесс вибросмешивания, параметры вибросмесителя, метод свертки критериев, целевая функция, нормированные критерии оптимальности.

Технологические процессы характеризуются большим числом факторов, что существенно усложняет задачу оптимизации. Однако ряд технологических задач требует специальной проработки. Так, при смешивании сыпучих кормов необходимо, чтобы однородность кормовой смеси соответствовала зоотехническим требованиям, удельная мощность процесса была минимальной, а производительность вибрационного смесителя – максимальной. Для оптимизации процесса вибросмешивания необходимо решить многокритериальную задачу, поскольку при сравнении любых двух критериев процесса возникают проблемы в том, что один из вариантов лучше по одному определяющему критерию и хуже по другому. В работе использован метод свертки критериев на основе весовых коэффициентов. Его сущность заключается в том, что целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев оптимальности, которые входят в целевую функцию  $W$  с некоторым весом  $\alpha_i$ , определяющим важность каждого критерия.

Следует также обратить внимание на то, что в целевой функции частные критерии, которые можно максимизировать, входят со знаком «+», а те, которые нужно минимизировать, – со знаком «-». Для отбора лучшего варианта процесса вибросмешивания нужно назначить весовые коэффициенты  $\alpha_i$  для каждого критерия. Для этого воспользовались методом экспертных оценок. На основании весовых коэффициентов составили целевую функцию для оптимизации процесса вибросмешивания. Максимизацию данной функции проводили численно в среде MathCAD с использованием функции Maximize. После расчетов определены оптимальные значения параметров: коэффициент перегрузки  $A\omega^2/g = 35,6$ , мас-

штабный фактор  $h/D = 1,2$ , безразмерное время виброобработки  $\omega t = 54050$ .

**Keywords:** optimization, vibro-mixing process, vibro-mixer parameters, criteria convolution method, objective function, normalized optimality criteria.

Technological processes are characterized by a large number of factors that significantly complicates the task of optimization. However a number of technological problems require special consideration. For example, when loose forages are mixed, the homogeneity of the forage mixture should conform to animal science requirements, the specific power of the process should be minimal, and the performance of the vibrating mixer should be maximal. To optimize the vibro-mixing process, a multicriterion problem should be solved, because when comparing any two criteria of the process the problems arise that one variant is better by one defining criteria and worse by another. The criteria convolution method is used based on the weight coefficients. The objective function is formed by adding the normalized values of the individual criteria of optimality in the objective function  $W$  with some weight  $\alpha_i$  which determines the significance of each criterion. It should also be noted that in the objective function the individual criteria that may be maximized are marked with +, and those that may be minimized are marked with -. To choose the best variant of the vibro-mixing process, the weight coefficients  $\alpha_i$  should be assigned to each criterion. The method of expert assessment was used. The objective function based on the weight coefficients was made to optimize the vibro-mixing process. The maximization of this function was done numerically in the MathCAD with the use of the Maximize function. The calculations defined the optimum values of the parameter: overload coefficient  $A\omega^2/g = 35.6$ ; scale factor  $h/D = 1.2$ ; and the non-dimensional time of the vibro-processing  $\omega t = 54050$ .

**Федоренко Иван Ярославович**, д.т.н., проф., зав. каф. «Механизация животноводства», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 628-387. E-mail: IJFedorenko@mail.ru.

**Котов Роман Александрович**, ст. преп., каф. «Безопасность жизнедеятельности», Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 628-326. E-mail: Cefiro312@mail.ru.

**Fedorenko Ivan Yaroslavovich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Animal Farming Mechanization, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 628-387. E-mail: IJFedorenko@mail.ru.

**Kotov Roman Aleksandrovich**, Asst. Prof., Chair of Life Safety, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 628-326. E-mail: Cefiro312@mail.ru.

### Введение

При проектировании и эксплуатации технических систем постоянно приходится решать задачи поиска наилучшего решения из некоторого множества допустимых решений. Математическая формулировка таких задач и вопросы их корректности требуют специального рассмотрения. Трудности, прежде всего, связаны с получением математического описания процесса и многокритериальностью задачи. При этом технологические процессы характеризуются большим числом факторов, что существенно усложняет задачу.

К настоящему времени накоплен огромный опыт решения оптимизационных задач как для конкретных приложений, так и в обобщенном виде [1-5]. Однако ряд технологических задач требует специальной проработки. Одним из таких процессов является процесс вибросмешивания.

Так, при смешивании сыпучих кормов необходимо, чтобы однородность кормовой смеси соответствовала зоотехническим требованиям, удельная мощность процесса была минимальной, а производительность вибрационного смесителя – максимальной.

**Цель** исследования – повышение эффективности процесса вибросмешивания путем оптимизации его параметров.

#### Задачи исследования:

1) выявить комплексный критерий оптимальности и получить целевую функцию для оптимизации процесса вибросмешивания;

2) определить значения параметров оптимальности (факторов) процесса вибросмешивания.

*Многокритериальная задача и метод решения.* В АГАУ предложен вибрационный смеситель с гибким рабочим органом, отличающийся низким уровнем шума и динамических нагрузок [6].

Для оптимизации процесса вибросмешивания необходимо решить многокритериальную задачу, поскольку при сравнении любых двух критериев процесса появляющиеся проблемы заключаются в том, что один из вариантов

лучше по одному определяющему критерию и хуже – по другому.

Для определения оптимальных значений факторов, которые бы удовлетворяли всем трем критериям оптимальности:  $\theta$  (однородность кормовой смеси),  $N_{уд}$  (удельная мощность),  $Q$  (производительность смесителя), решим многокритериальную задачу.

Для ее решения используем метод свертки критериев на основе весовых коэффициентов [7]. Его сущность заключается в том, что целевая функция образуется путем сложения нормированных значений частных критериев оптимальности, которые входят в целевую функцию  $W$  с некоторым весом  $\alpha$ , определяющим важность каждого критерия. Таким образом, целевая функция примет вид:

$$W = \alpha_{\theta} \cdot W_{\theta}(x_i) - \alpha_N \cdot W_N(x_i) + \alpha_Q \cdot W_Q(x_i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\theta}, \alpha_N, \alpha_Q$  – вес (важность) каждого критерия оптимальности, соответственно, для однородности смеси ( $\theta$ ), удельной мощности ( $N_{уд}$ ) и производительности смесителя ( $Q$ );

$W_{\theta}, W_N, W_Q$  – нормированные критерии оптимальности.

Следует также обратить внимание на то, что в целевой функции (1) частные критерии, которые можно максимизировать, входят со знаком «+», а те, которые нужно минимизировать, – со знаком «-» [7].

Проведем нормирование критериев оптимальности. Вспомним, что свободный член уравнения регрессии представляет собой среднее значение критерия оптимальности в зоне эксперимента (т.е. при  $x_1=x_2=\dots=x_i=0$ ). Поэтому если разделить каждый из членов уравнения регрессии на  $b_0$ , то получим, что в каждом уравнении регрессии нормированный критерий оптимальности будет изменяться около значения 1.

Ранее нами были получены уравнения регрессии отдельно для всех критериев оптимальности (в кодированном виде):

$$\theta(x_i) = 71,00 - 4,75x_1 + 3,63x_3 + 7,25x_1x_2 + 2,75x_1x_3 + 4,88x_2^2; \quad (2)$$

$$N_{уд}(x_i) = 12,31 + 3,66x_1 - 2,09x_2 + 0,63x_1^2 - 0,93x_1x_2 - 0,77x_2^2; \quad (3)$$

$$Q(x_i) = 0,22 + 0,121x_2 - 0,036x_3 + 0,291x_2^2 - 0,198x_3^2, \quad (4)$$

где  $x_1$  – коэффициент перегрузки  $A\omega^2 / g$  ;

$x_2$  – масштабный фактор  $h / D$  ;

$x_3$  – безразмерное время виброобработки  $\omega t$  .

Для уравнения регрессии однородности кормовой смеси нормирование приведет к результату:

$$W_\theta = \frac{\theta(x_i)}{b_0} = 1 - \frac{4,75x_1}{71} + \frac{3,63x_3}{71} + \frac{7,25x_1x_2}{71} + \frac{2,75x_1x_3}{71} + \frac{4,88x_2^2}{71} =$$

$$= 1 - 0,067x_1 + 0,051x_3 + 0,102x_1x_2 + 0,039x_1x_3 + 0,068x_2^2. \quad (5)$$

Аналогично получим нормированные значения для других критериев оптимальности:

$$W_N = \frac{N_{уд}(x_i)}{b_0} = 1 + \frac{3,66x_1}{12,31} - \frac{2,09x_2}{12,31} + \frac{0,63x_1^2}{12,31} - \frac{0,93x_1x_3}{12,31} - \frac{0,77x_2^2}{12,31} =$$

$$= 1 + 0,297x_1 - 0,17x_2 + 0,051x_1^2 - 0,076x_1x_2 - 0,063x_2^2. \quad (6)$$

$$W_Q = \frac{Q(x_i)}{b_0} = 1 + \frac{0,121x_2}{0,22} - \frac{0,036x_3}{0,22} + \frac{0,291x_2^2}{0,22} - \frac{0,198x_3^2}{0,22} =$$

$$= 1 + 0,55x_2 - 0,164x_3 + 1,318x_2^2 - 0,864x_3^2. \quad (7)$$

Для отбора лучшего варианта процесса вибросмешивания нужно назначить весовые коэффициенты  $\alpha_i$  для каждого критерия. Для этого воспользовались методом экспертных оценок.

Опрос специалистов по методике, изложенной в [7], дал следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1

**Экспертные оценки и их обработка**

Эксперт	Критерий оптимальности			Сумма
	$\theta$	$Q$	$N_{уд}$	
1	0,7	0,25	0,05	1
2	0,75	0,19	0,06	1
3	0,75	0,19	0,06	1
4	0,7	0,24	0,06	1
5	0,7	0,24	0,06	1
6	0,65	0,3	0,05	1
7	0,75	0,19	0,06	1
8	0,7	0,25	0,05	1
9	0,7	0,25	0,05	1
Среднее значение коэффициента веса, $\alpha$	0,71	0,23	0,06	
Среднее квадратичное отклонение, $s$	0,03	0,03	0,005	
Коэффициент вариации, $v$	0,04	0,15	0,09	

Таким образом, полученные данные для  $\alpha_i$  таковы:

$$\alpha_\theta = 0,71; \alpha_Q = 0,06; \alpha_N = 0,23.$$

С учетом полученных данных целевая функция приобретет вид:

$$W = 0,71(1 + 0,297x_1 - 0,17x_2 + 0,051x_1^2 - 0,076x_1x_2 - 0,063x_2^2) +$$

$$+ 0,23(1 + 0,55x_2 - 0,164x_3 + 1,318x_2^2 - 0,864x_3^2) -$$

$$- 0,06(1 + 0,297x_1 - 0,17x_2 + 0,051x_1^2 - 0,076x_1x_2 - 0,063x) \rightarrow \max. \quad (8)$$

Максимизацию данной функции проводили численно в среде MathCAD с использованием функции Maximize.

Результаты этой процедуры представлены в таблице 2, где приведены компромиссные значения однородности кормовой смеси, производительности смесителя и удельной мощности процесса вибросмешивания.

В соответствии с выбранными критериями определены оптимальные значения парамет-

ров: коэффициент перегрузки  $A\omega^2 / g = 35,6$ , масштабный фактор  $h / D = 1,2$ , безразмерное время виброобработки  $\omega t = 54050$  .

Таблица 2

**Компромиссные значения критериев оптимальности процесса вибросмешивания**

Критерий оптимальности		
$\theta$ , %	$N_{уд}$ , Вт/кг	$Q$ , т/ч
95,01	8,7	0,5

**Выводы**

1. Получен комплексный критерий оптимальности, а также целевая функция для оптимизации процесса вибросмешивания. Предложенный критерий может быть использован для оптимизации аналогичных технологических процессов.

2. Результаты многокритериальной оптимизации обнаруживают соответствие полученных результатов по качеству кормовой смеси (т.е. ее однородность) зоотехническим нормам. Затраты энергии и производительность смесителя приемлемы для приготовления премиксов, БВМК, а, возможно, и комбикормов (для сельских подворий и небольших фермерских хозяйств).

**Библиографический список**

1. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде. – М.: Физматлит, 2004. – 176 с.  
 2. Подиновский В.В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. – М.: Физматлит, 2007. – 64 с.  
 3. Kiefer J. Optimum designs in regression problems. – Ann. Math. Stat., 1959. – V 30. – P. 271-294.  
 4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.  
 5. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: учебное пособие. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.  
 6. Пат. 2421271 Российская Федерация, С 1 В01 F3/18, В01 F 11/00. Смеситель для

сыпучих материалов / Федоренко И.Я., Пирожков Д.Н., Котов Р.А.; заявитель и патентообладатель И.Я. Федоренко; заявл. 08.02.2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17.

7. Федоренко И.Я., Морозова С.В. Оптимизация и принятие решений в агроинженерных задачах учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2012. – 238 с.

**References**

1. Nogin V.D. Prinyatie reshenii v mnogokriterial'noi srede. – M.: Fizmatlit, 2004. – 176 s.  
 2. Podinovskii V.V. Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh prinyatiya reshenii. – M.: Fizmatlit, 2007. – 64 s.  
 3. Kiefer J. Optimum designs in regression problems // Ann. Math. Statist. – 1959. – Vol. 30. – P. 271-294.  
 4. Saati T. Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii. Per. s angl. – M.: Radio i svyaz', 1993. – 278 s.  
 5. Sobol' I.M., Statnikov R.B. Vybora optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami: uchebnoe posobie. – M.: Drofa, 2006. – 175 s.  
 6. Pat. 2421271 Rossiiskaya Federatsiya, S 1 B01 F3/18, B01 F 11/00. Smesitel' dlya sypuchikh materialov / I.Ya. Fedorenko, D.N. Pirozhkov, R.A. Kotov; zayavitel' i patentoobladatel' I.Ya. Fedorenko. Zayavl. 08.02.2010; opubl. 20.06.2011, Byul. № 17.  
 7. Fedorenko I.Ya., Morozova S.V. Optimizatsiya i prinyatie reshenii v agroinzhenernykh zadachakh: uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2012. – 238 s.



УДК 621.384.3:664.039.51:635.1.2

**И.В. Алтухов, Н.В. Цугленок**  
**I.V. Altukhov, N.V. Tsuglenok**

**ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНЫХ ИК-ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ  
 В ТЕХНОЛОГИИ СУШКИ КОРНЕКЛУБНЕПЛОДОВ**

**THE OPERATIONAL FEATURES OF PULSE IR-EMITTERS IN ROOT CROP DRYING TECHNOLOGY**

**Ключевые слова:** сушка, импульсные ИК-излучатели, корнеклубнеплоды, нагрев, спектр.

Анализ развития электротехнологий, применяемых для сушки сельскохозяйственного сырья, показывает, что широкое применение получили установки, работающие на принципе использования электрической энергии, превращенной в энергию инфракрасного излучения. К числу важнейших

характеристик ИК-излучателей относят спектральные, энергетические и геометрические. Спектральные характеристики ИК-излучателей зависят в основном от температуры нагрева излучателя, и в настоящее время достаточно хорошо изучены. Если для процесса нагрева используются ИК-излучатели, то следует подумать о том, что экономичный нагрев сырья связан со степенью излучения (черноты). Высокий эффект будет достигнут в