

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 631.363.2.636

**В.В. Садов, С.А. Сорокин**  
V.V. Sadov, S.A. Sorokin

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ ПОДАЧИ КОМПОНЕНТОВ ПРИ РАБОТЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ВИБРАЦИОННОГО ДОЗАТОРА

### DETERMINATION OF THE UNIFORMITY OF FEEDING COMPONENTS DURING OPERATION OF A MULTI-COMPONENT VIBRATION DISPENSER

**Ключевые слова:** *вибрационный дозатор, коэффициент вариации, подача компонентов, масштабный фактор, вибрационный аналог числа Рейнольдса, коэффициент перегрузки.*

В производстве комбикормов используется большое количество различных зерновых, минеральных и других компонентов. В этом случае без дозатора обойтись невозможно. Основное требование при дозировании компонентов – соблюдение равномерности подачи в соответствии с требованием ГОСТа. Однако при объемном дозировании за счет неравномерности свойств материалов очень трудно выдержать требуемую точность. Выявленные факторы, оказывающие наибольшее влияние на равномерность дозирования, а именно масштабный фактор, вибрационный аналог числа Рейнольдса, коэффициент перегрузки сыпучего материала и соотношение подач компонентов позволили установить взаимосвязь между важнейшими параметрами, определяющими качество смеси, в широком диапазоне исследования рабочего процесса дозирования. Также для различных комбинаций двух фак-

торов были получены уравнения регрессии коэффициента вариации подачи и поверхности отклика. На основании теоретических и экспериментальных данных были построены зависимости коэффициента вариации соотношения подач от производительности дозатора. При суммарной подаче всех секций многокомпонентного дозатора, близкой к 330 кг/ч, коэффициент вариации соотношения подач находится на уровне 3%, а при большей подаче принимает значение ниже 3% уровня, что удовлетворяет требованиям ГОСТа, предъявляемым к дозаторам комбикормовой промышленности. Рациональные значения исследуемых параметров многокомпонентного вибрационного дозатора, при которых наиболее полно раскрываются преимущества связанного дозирования, позволяют снизить величину коэффициента вариации соотношения подач ниже 3%. В этом случае варьируемые факторы принимают следующие значения: масштабный фактор, выраженный высотой побудительных лопаток  $D=48$  мм и коэффициентом перегрузки  $\gamma=2,5$ , что соответствует массе дебаланса, равной 0,625 кг, при угловой скорости  $\omega=156,6$  с<sup>-1</sup>.

**Keywords:** *vibration dosing unit, coefficient of variation, component feed, scale factor, vibration analogue of the Reynolds number, overload factor.*

A large number of different grains, minerals and other components are used in the production of animal formula feeds. In this case, it is impossible to do without a dispenser. The main requirement for the dosing of components is the compliance with the uniformity of supply in accordance with the requirements of the GOST (National Standard). However, at large-volume dosing, due to the unevenness of material properties, it is very difficult to follow the required accuracy. The identified factors that have the greatest influence on the uniformity of dosing, namely, the scale factor, the vibration analogue of the Reynolds number, the bulk material transfer factor and the ratio of component feeds allowed revealing the relationship between the most important parameters determining the quality of the mixture in a wide range of studies of the dosing workflow. Also, for different combinations of the

two factors, the regression equations for the variation of the feed and the response surface were obtained. On the basis of theoretical and experimental data, dependences of the coefficient of variation of the feed ratio on the performance of the dispenser were constructed. With a total feed of all sections of a multicomponent dispenser close to 330 kg h, the coefficient of variation of the feed ratio is at the level of 3%, and at a higher flow it takes a value below 3% of the level, which is within the GOST requirements regarding formula feed industry. Rational values of the studied parameters of a multicomponent vibrating dispenser when the advantages of coherent dispensing are most fully revealed and allow reducing the value of the variation ratio of the feed ratio below 3%. In this case, the variable factors take the following values: the scale factor, expressed as the height of the impeller blades  $D = 48$  mm and the overload coefficient  $r = 2.5$ , which corresponds to the unbalance mass equal to 0.625 kg, with an angular velocity  $\omega = 156.6$  s<sup>-1</sup>.

**Садов Виктор Викторович**, д.т.н., доцент, каф. механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-272. E-mail: sadov.80@mail.ru.

**Сорокин Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент каф. механики и инженерной графики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-364. E-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

**Sadov Viktor Viktorovich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Agricultural Production and Processing Mechanization, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-272. E-mail: sadov.80@mail.ru.

**Sorokin Sergey Anatolyevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Mechanics and Engineering Graphics, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-364. E-mail: Sorokin\_sg@mail.ru.

## Введение

При приготовлении комбикормов очень часто используют одновременное измельчение всех компонентов. Это позволяет снизить негативные факторы при измельчении по отдельности каждого компонента, а именно: трудноизмельчаемые компоненты – ячмень, компоненты имеющие малый удельный вес, – оболочка гороха, шелуха подсолнечника, цветочная оболочка овса, жмых налипает на стенки из-за находящегося в нем масла и т.д. [1].

Для одновременного измельчения необходимо обеспечить равномерную подачу в соответствии с требуемым соотношением компонентов. Отклонение процентного содержания отдельных компонентов от заданной рецептом величины снижает кормовую и биологическую питательную ценность комбикорма, приводит к нарушению баланса минеральных элементов в организме животного, что

неудовлетворительно сказывается на продуктивности, росте и здоровье сельскохозяйственных животных. Это можно реализовать многокомпонентными дозаторами.

**Цель** исследования – определить коэффициент вариации подачи компонентов при дозировании вибрационным многокомпонентным дозатором.

## Объекты и методы исследований

Процесс дозирования представляет многофакторный объект, поэтому большое внимание необходимо уделить правильному их выбору [2]. Основываясь на теоретические и практические исследования в области многокомпонентного дозирования сыпучих материалов, установим факторы, оказывающие влияние на процесс истечения материала в вибрационном дозаторе. Для проведения экспериментальных исследований используем факторы:  $B$  – масштабный фактор;  $\sigma$  – виб-

рациональный аналог числа Рейнольдса;  $r$  – коэффициент перегрузки сыпучего материала;  $\varepsilon$  – соотношение подач компонентов [3, 4].

При оценке качества многокомпонентных дозаторов, необходимо перейти к рассмотрению отклонений заданного соотношения подач компонентов в готовой смеси, используя коэффициент вариации:

$$V_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{\varepsilon}}{\varepsilon_{cp}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\varepsilon}$  – дисперсия отношения подач компонентов смеси;

$\varepsilon_{nd}$  – отношения подач компонентов смеси.

Найдем дисперсию отношения подач из выражения:

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{cp})^2}{n}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i$  – отношение компонентов смеси по результатам  $i$ -го отбора пары проб;

$\varepsilon_{cp}$  – среднеарифметическое значение соотношения компонентов смеси по результатам  $n$  проб.

Для эксперимента использовали многокомпонентный вибрационный дозатор конструкции Алтайского ГАУ по а.с. № 1720944 (рис. 1) [5].

Имеющиеся априорные данные позволили выбрать интервалы варьирования, пределы которых охватили бы наиболее важную, с нашей точки зрения, зону эксперимента (табл. 1).



**Рис. 1. Многокомпонентный вибрационный дозатор:**  
 1 – бункер; 2 – секции дозатора; 3 – побудительные лопатки; 4 – тросовые подвесы;  
 5 – регулировочные винты; 6 – концентратор потока материала

Таблица 1

**Факторы и интервалы варьирования эксперимента**

Обозначение	Наименование фактора	Значение		
		-1	0	+1
$X_1$	Масштабный фактор, $B$	0,833	1,667	2,500
$X_4$	Вибрационный аналог числа Рейнольдса, $\sigma$	0,0005	0,0007	0,0009
$X_2$	Коэффициент перегрузки сыпучего материала, $r$	1,123	2,287	3,451
$X_3$	Соотношение подач компонентов, $\varepsilon$	1/1	1/2,5	1/5

**Результаты исследования**

Проведенный эксперимент по плану Бокса-Бенкина в трехкратной повторности на кормовых материалах с различными физико-механическими свойствами позволил установить взаимосвязь

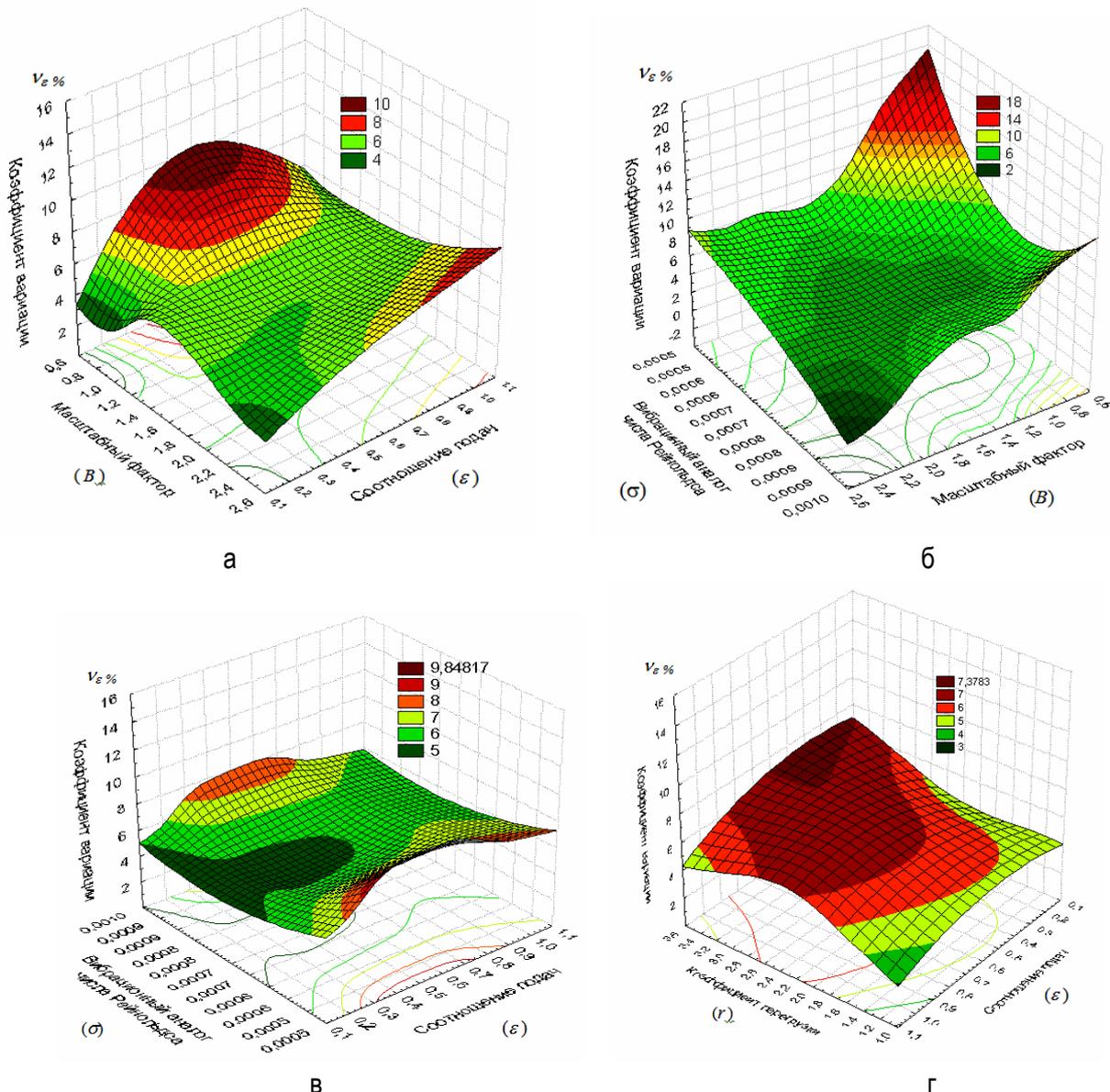
между важнейшими параметрами, определяющими качество смеси, в широком диапазоне исследования рабочего процесса дозирования.

После раскодирования переменных уравнение регрессии имеет вид:

$$\begin{aligned}
 v_{\varepsilon} = & 1279,28 - 20,428 B + 2404,724 \sigma - 2212,212 r + 552,466 \varepsilon + 108,282 B^2 + \\
 & + 26401,552 B \sigma - 70,341 Br - 394,801 B \varepsilon + 94,247 \sigma^2 - 27961,342 r \cdot \sigma + \\
 & + 1185,713 r^2 + 1113,698 r \varepsilon - 227,197 r \sigma + 109,406 \varepsilon^2 - 18,498 B^3 - 12948,5 B^2 \sigma - \\
 & - 2,437 B^2 r + 0,464 B^2 \varepsilon + 190,044 B \sigma^2 + 4609,843 B \sigma r + 10929,98 B \sigma \varepsilon + \\
 & + 2,985 B \sigma^2 + 153,171 Br \varepsilon + 30,692 B \varepsilon^2 + 0,596 \sigma^3 + 169,799 \sigma^2 r + 38,682 \sigma^2 \varepsilon + \\
 & + 6436,607 \sigma r^2 - 10675,2 \sigma r \varepsilon + 4213,805 \sigma \varepsilon^2 - 163,513 r^3 - 2,726 r^2 \varepsilon - 7,311 r \varepsilon^2 - 93,861 \varepsilon^3.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Проверка уравнения регрессии на адекватность по критерию Фишера подтвердилась.

Построим согласно модели уравнения (3) поверхности отклика для визуальной оценки влияния того или иного параметра на изменение коэффициента вариации соотношения подач  $v_{\varepsilon}$  (рис. 2) [6].



**Рис. 2. Зависимость коэффициента вариации соотношения подач  $v_{\varepsilon}$  от исследуемых факторов**

Уравнение регрессии для рисунка 2а для факторов  $B$ ,  $\varepsilon$  имеет вид:

$$v_{\varepsilon} = 12,2289 - 7,4461 B + 0,7976 \varepsilon + 1,4934 \varepsilon^2 + 2,7142 \varepsilon B - 3,7182 B^2. \quad (4)$$

Для рисунка 2б для факторов  $\sigma$ ,  $B$  уравнение имеет вид:

$$v_{\varepsilon} = 38,6438 - 7,1973 B - 74833,4847 \sigma + 2,184 B^2 - 1834,3946 B \sigma + 5,3122 E7 \sigma^2. \quad (5)$$

Для рисунка 2в для факторов  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  уравнение имеет вид:

$$v_{\varepsilon} = 28,6074 - 66645,6191 \sigma + 3,4493 \varepsilon^2 + 4,492 \sigma^2 + 507,4112 \sigma - 2,4538 \varepsilon^2. \quad (6)$$

Для рисунка 2г для факторов  $r$ ,  $\varepsilon$  уравнение имеет вид:

$$v_{\varepsilon} = 0,1732 + 2,0794 \varepsilon + 9,2611 r - 0,184 \varepsilon^2 - 0,5966 \varepsilon r - 5,864 r^2. \quad (7)$$

Большие коэффициенты значимости факторов и их сочетаний указывают на сложную взаимосвязь параметров, управляющих процессом истечения сыпучего материала, подверженного вибрационному ожигению.

Существенное влияние на процесс многокомпонентного дозирования в равной степени оказывают все четыре фактора, об этом свидетельствуют большие модули коэффициентов при каждом из них.

Коэффициенты, значения которых больше нуля, знак  $/+$ , указывают на то, что между параметром оптимизации и факторами при таких коэффициентах существует прямая зависимость, знак  $/-$  указывает на обратную связь с их параметром. Так, обработка данных эксперимента показала снижение коэффициента вариации соотношения подач  $v_{\varepsilon}$ , при возрастающем значении коэффициента перегрузки  $r$  и величины геометрического параметра  $B$ , и снижение его при увеличении модуля факторов  $\sigma$  и  $\varepsilon$ .

Эксперимент показал в работе с широким диапазоном вязкости сыпучего материала (от мелкодисперсного до крупнодисперсного) возрастание масштабного параметра до значения, близкого к 1,6, ведет к повышению точности дозирования многокомпонентной смеси. Дальнейшее увеличе-

ние масштабного фактора, выраженное увеличением высоты побудительных лопаток, не приводит к снижению параметра оптимизации, только провоцирует повышенную энергоемкость процесса. Объясняется это увеличением объема дозируемого материала, вовлеченного в колебательное движение и, как следствие, возникновению более интенсивного рассеяния механической энергии.

На величину коэффициента вариации большое влияние оказывает общая (по всем секциям) производительность дозатора. Эксперимент показал, что с ростом подачи материала неравномерность потока снижается (рис. 3).

Теоретическое определение коэффициента вариации соотношения подач рассчитано по выражению (8)

$$v_{\varepsilon} = \frac{\sigma_{q_x} p_i}{q_y \varepsilon} - \frac{\sigma_{q_y} \varepsilon}{q_x p_i}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{q_y}$ ,  $\sigma_{q_x}$  - дисперсии подач компонентов;

$p_i$  - коэффициент связности дозаторов в системе;

$\varepsilon$  - соотношение подач компонентов;

$q_y$ ,  $q_x$  - величина расхода дозируемых компонентов смеси, определяющих общую производительность дозатора  $Q$ .

Сравнение теоретической и экспериментальной функциональных зависимостей коэффициента вариации  $v_{\varepsilon}$  от производительности дозатора  $Q$  показывает их согласованность, выраженную коэффициентом корреляции  $r=0,97$ , результаты расчета приведены в сводной таблице 2. Данный показатель говорит о том, что теоретические предпосылки верны и формула (8) пригодна для определения неравномерности соотношения подач двух компонентной смеси. Наименьшее значение коэффициента вариации получаем при увеличении подач дозируемого материала и при повышении качества работы отдельных секций дозатора, оцениваемой дисперсией подач компонентов  $\sigma_{q_y}$ ,  $\sigma_{q_x}$ .

Теоретическая зависимость оценивает качество смеси при известных характеристиках парно работающих дозаторов системы: дисперсии подач компонентов; коэффициенте связности дозаторов в системе; величине расхода дозируемых компонентов смеси.

В расчете приняты осредненные дисперсии для двух секций многокомпонентного дозатора по данным основного эксперимента.

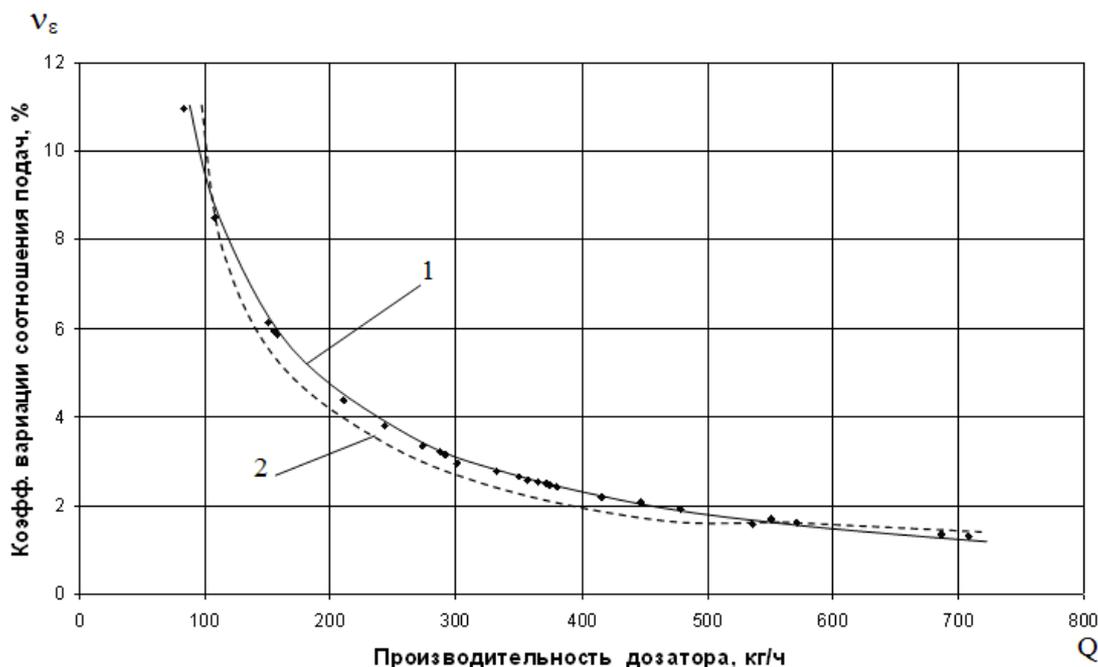
Из рисунка 3 видно, что при суммарной подаче всех секций многокомпонентного дозатора близкой к 330 кг/ч коэффициент вариации соотношения подач  $v_\varepsilon$  находится на уровне 3%, а при большей подаче принимает значение ниже 3% уровня, что удовлетворяет требованиям ГОСТа, предъявляемым к дозаторам комбикормовой промышленности [7].

Важно отметить наличие слабой зависимости  $v_\varepsilon$  от соотношения подач, на что указывает малый коэффициент при этом факторе в выражении (3). Поэтому отсутствие жестких ограничений по ве-

личине соотношения компонентов смеси дает свободу в составлении комбикормов разнообразных рецептов, что положительно характеризует систему дозирования в целом и делает ее привлекательной для многих отраслей животноводства.

Анализируя уравнение регрессии (3), приходим к выводу, что решающее значение на точность соотношений компонентов в готовой смеси оказывает амплитуда колебаний рабочих органов дозатора, которая является составляющей параметров  $\sigma$  и  $r$ . Величина коэффициентов при них свидетельствует об этом. Амплитуда рабочих органов дозатора находится в тесной связи с массой дебаланса маятникового вибрационного привода.

В процессе исследований и анализа имеющегося опыта в области вибрационного дозирования установлено, что истечение зернистого материала протекает наиболее равномерно при наличии только поступательных колебаний в отсутствии каких-либо других.



**Рис. 3. Зависимость коэффициента вариации соотношения подач  $v_\varepsilon$  от производительности дозатора Q:**

**1 – экспериментальная кривая (по данным опыта на основном уровне для пшеницы);  
2 – теоретическая кривая**

**Сводные данные к расчету коэффициента вариации соотношения подач  
в зависимости от производительности дозатора**

№	Соотн. подач комп., $\varepsilon$	Подача $i$ -ого комп., $Q_i$ (г/сек.)	Подача $j$ -ого комп., $Q_j$ (г/сек.)	Дисперс. $i$ -ого комп., $\sigma_i$	Дисперс. $j$ -ого комп., $\sigma_j$	Коэфф. вариаци., $v_\varepsilon$ % (опыт.)	Коэфф. вариаци., $v_\varepsilon$ % (расч.)	Коэфф. связн., $\rho$
1	1	43,1	47,3	10,7	4,82	5,8	7,428	26
2	1	41,8	43,4	10,7	4,82	7,02	6,641	26
3	1	30	30,7	10,7	4,82	7,14	9,23	26
4	1	43,7	42,7	10,7	4,82	5,94	6,341	26
5	1	23,3	22,6	10,7	4,82	3,64	3,638	26
6	1	43,2	41,2	10,7	4,82	5,11	6,42	26
7	2,5	106	44,6	10,7	4,82	5,55	5,638	26
8	2,5	79,6	32,7	10,7	4,82	2,06	3,483	26
9	2,5	75,9	31,4	10,7	4,82	9,17	8,096	26
10	2,5	99,3	40,7	10,7	4,82	3,03	2,792	26
11	2,5	101	41,2	10,7	4,82	3,4	2,733	26
12	2,5	92,3	37,3	10,7	4,82	3,89	3,001	26
13	2,5	104	41,9	10,7	4,82	4,9	4,298	26
14	2,5	115	46,7	10,7	4,82	10,42	2,381	26
15	2,5	58,4	23,4	10,7	4,82	7,71	7,646	26
16	2,5	67,5	26,7	10,7	4,82	5,78	4,101	26
17	2,5	97,1	38,2	10,7	4,82	4,16	4,613	26
18	2,5	81	31,7	10,7	4,82	4,12	3,422	26
19	2,5	103	40,2	10,7	4,82	3,96	2,684	26
20	2,5	83,7	29,5	10,7	4,82	3,4	3,189	26
21	2,5	149	49,6	10,7	4,82	1,89	1,721	26
22	5	124	26,9	10,7	4,82	1,69	2,225	26
23	5	153	31,8	10,7	4,82	1,58	1,822	26
24	5	159	33,3	10,7	4,82	1,43	1,742	26
25	5	133	27,3	10,7	4,82	4,643	2,07	26
26	5	191	38,7	10,7	4,82	1,68	1,448	26
27	5	197	39,3	10,7	4,82	5,92	2,274	26

**Выводы**

Повышение качества смеси происходит при увеличении точности выдачи доз каждым дозатором, увеличении их кинематической взаимосвязанности то есть побуждением к истечению единым возмущающим воздействием, во всех секциях дозатора (в виде общего рабочего органа), либо жесткой кинематической связью в приводах. Для дозатора рассматриваемой конструкции при суммарной подаче двух секций выше 330 кг/ч коэффициент вариации принимает значение 3%.

Определены рациональные значения исследуемых параметров многокомпонентного вибрационного дозатора, при которых наиболее полно раскрываются преимущества связного дозирования, позволяющие снизить величину коэффициента вариации соотношения подач ниже 3%. В этом случае варьируемые факторы принимают следующие значения: масштабный фактор, выраженный высотой побудительных лопаток  $D=48$  мм и коэффициентом перегрузки  $\gamma=2,5$ , что соответствует массе дебаланса, равной 0,625 кг, при угловой скорости  $\omega = 156,6$  с<sup>-1</sup>.

**Библиографический список**

1. Федоренко И.Я., Садов В.В. Технологическая оптимизация хозяйственных комбикормовых предприятий: монография. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2017. – 252 с.
2. Федоренко И.Я., Садов В.В. Особенности решения многокритериальных агроинженерных задач при трех критериях оптимальности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 5 (91). – С. 110-114.
3. Федоренко И.Я., Сорокин С.А. Исследование вынужденных колебаний подвижной части вибрационного дозатора // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2006. – № 3 (23). – С. 58-61.
4. Сорокин С.А., Новожилов И.Л., Левищев И.В., Коняев Н.В., Блинков Б.С. Динамика вибрационного дозатора закрепленного на маятниковых подвесах // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. –

Курск: Изд-во ФГБОУ ВО Курской ГСХА, 2018. – № 8. – С. 190-197.

5. А.с. 1720944. Вибрационный питатель / И.Я. Федоренко, В.И. Земсков, С.Н. Васильев, В.А. Старцев. – Оpubл. 23.03.1992.

6. Winer B.J. Statistical Principles in Experimental Design, New York: McGraw-Hill, 1992.

7. Методические рекомендации по технологическому проектированию предприятий по производству комбикормов РД-АПК 1.10.17.01-15. – М.: Минсельхоз РФ, 2015. – 110 с.

**References**

1. Tekhnologicheskaya optimizatsiya khozyaystvennykh kombikormovykh predpriyatiy: monografiya / I.Ya. Fedorenko, V.V. Sadov. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2017. – 252 s.
2. Fedorenko I.Ya., V.V. Sadov Osobennosti resheniya mnogokriterialnykh agroinzhenernykh zadach pri trekh kriteriyakh optimalnosti. // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2012. – No. 5 (91). – S. 110-114.
3. Fedorenko I.Ya., Sorokin S.A. Issledovanie vynuzhdennykh kolebaniy podvizhnoy chasti vibratsionnogo dozatora // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2006. – No. 3 (23). – S. 58-61.
4. Sorokin S.A., Novozhilov I.L., Levishchev I.V., Konyaev N.V., Blinkov B.S. Dinamika vibratsionnogo dozatora zakreplennogo na mayatnikovyykh podvesakh // Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. – 2018. – No. 8. – S. 190-197.
5. A.s. 1720944. Vibratsionnyy pitatel / I.Ya. Fedorenko, V.I. Zemskov, S.N. Vasilev, V.A. Startsev. – Opubl. 23.03.1992.
6. Winer B.J. Statistical Principles in Experimental Design, New York: McGraw-Hill, 1992.
7. Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu predpriyatiy po proizvodstvu kombikormov RD-APK 1.10.17.01-15. – M.: Min selkhoz RF, 2015. – 110 s.

