

## Расчет конструктивных и технологических параметров работы центробежно-шнекового смесителя для получения сухих хлебобулочных смесей функционального назначения

Дмитрий М. Бородулин	<sup>1</sup>	<a href="mailto:borodulin_dmitri@list.ru">borodulin_dmitri@list.ru</a>
Дмитрий И. Киселев	<sup>1</sup>	<a href="mailto:idos-92@mail.ru">idos-92@mail.ru</a>
Маргарита Т. Шулбаева	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sh-m-t@yandex.ru">sh-m-t@yandex.ru</a>
Елена А. Вагайцева	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vagaitseva@mail.ru">vagaitseva@mail.ru</a>
Антон В. Шафрай	<sup>1</sup>	<a href="mailto:shafraia@mail.ru">shafraia@mail.ru</a>

<sup>1</sup> Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (ун-т), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия

**Реферат.** Инновационная и научная деятельность по созданию высокоэффективного оборудования для производства качественных смесей функционального назначения, является актуальной задачей. Одной из самых трудоемких операций в данной технологии является равномерное распределение частиц по всему объему смеси и получении однородной массы. Для достижения цели в статье представлен алгоритм расчета конструктивных и технологических параметров шнека и центробежно-шнекового смесителя. В данном алгоритме производили расчет производительности  $Q$ , диаметра шнека  $D$  и критической его частоты вращения  $n_{кр}$  в зависимости от выбранных материалов и от их физико-механических параметров, а так же скорость движения материалов по поверхности конуса, диаметр конуса, диаметр и высоту обечайки, и в заключении коэффициент неоднородности, характеризующий качество получаемой смеси. На основе данного алгоритма разработана программа ЭВМ. По полученным данным программа строит график зависимости диаметра шнека от производительности и его критической частоты вращения, где отображена точка рациональных параметров работы шнека при получении комбинированной смеси. В программе ЭВМ представлены результаты расчета технологических и конструктивных параметров (диаметре шнека 0,02 м, производительности 47,89 кг/ч и критической частоты вращения ротора шнека 456,5 об/мин) и сравнили с экспериментальными значениями, в результате чего получили среднюю относительную погрешность, которая не превышает 10%, следовательно, что приведенный алгоритм расчета центробежно-шнекового смесителя можно использовать для предсказания значений рациональных конструктивных и технологических параметров работы смесителя, а также спрогнозировать качество смеси полученной на нём.

**Ключевые слова:** шнек, смешивание, смеситель, качество смешивания, программа ЭВМ, алгоритм, рациональные параметры

## Calculation of constructive and technological parameters of the centrifugal-screw mixer for dry bakery mixtures of functional purpose obtaining

Dmitrij M. Borodulin	<sup>1</sup>	<a href="mailto:borodulin_dmitri@list.ru">borodulin_dmitri@list.ru</a>
Dmitrij I. Kiselev	<sup>1</sup>	<a href="mailto:idos-92@mail.ru">idos-92@mail.ru</a>
Margarita T. Shulbaeva	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sh-m-t@yandex.ru">sh-m-t@yandex.ru</a>
Elena A. Vagaitseva	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vagaitseva@mail.ru">vagaitseva@mail.ru</a>
Anton V. Shafrai	<sup>1</sup>	<a href="mailto:shafraia@mail.ru">shafraia@mail.ru</a>

<sup>1</sup> Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia

**Summary.** Innovative and scientific activity on the creation of highly efficient equipment for the production of high-quality mixtures of functional purpose is an urgent task. One of the most labour-intensive operations in this technology is the uniform distribution of particles throughout the whole volume of mixture and homogeneous mass obtaining. To achieve this goal the algorithm for calculating of structural and technological parameters of the screw and centrifugal-screw mixer was presented in the article. In this algorithm, the authors calculated the productivity  $Q$ , the screw diameter  $D$ , and its critical rotating speed  $n_{cr}$ , depending on the materials selected and on their physico-mechanical parameters, as well as the materials velocity along the surface of the cone, the cone diameter, the diameter and the height of the shell, and in conclusion the inhomogeneity coefficient characterizing the quality of the mixture obtained. Based on this algorithm, the computer program was developed. According to the data obtained, the program builds a dependence graph of the screw diameter on its capacity and its critical rotation speed, where the point of rational parameters of the screw work during the production of the combined mixture is displayed. The results of calculation of technological and design parameters (screw diameter 0.02 m, capacity 47.89 kg/h and critical rotational speed of the screw rotor 456.5 rpm) were presented and compared with experimental values in the computer program. As a result, we obtained an average relative error, which does not exceed 10%. So the above algorithm for calculating of the centrifugal-screw mixer can be used to predict the values of rational design and technological parameters of the mixer operation, as well as to predict the quality of the mixture obtained with it

**Keywords:** screw, mixing, mixer, mixing quality, computer program, algorithm, rational parameters.

Для цитирования

Бородулин Д.М., Киселев Д.И., Шулбаева М.Т., Вагайцева Е.А., Шафрай А.В. Расчет конструктивных и технологических параметров работы центробежно-шнекового смесителя для получения сухих хлебобулочных смесей функционального назначения // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 1. С. 62–69. doi:10.20914/2310-1202-2018-1-62-69

For citation

Borodulin D.M., Kiselev D.I., Shulbaeva M.T., Vagaitseva E.A., Shafrai A.V. Calculation of constructive and technological parameters of the centrifugal-screw mixer for dry bakery mixtures of functional purpose obtaining. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2018. vol. 80. no. 1. pp. 62–69. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2018-1-62-69

### Введение

При производстве сухих хлебобулочных смесей, необходимо получать равномерное распределение компонентов в общей сыпучей массе, которое требует больших усилий, чем при получении жидких и пастообразных смесей. При этом основной проблемой является создание благоприятных условий для взаимного перемещения частиц сыпучих компонентов во всем объеме получаемой смеси. Помимо этого, часто необходимо учитывать еще ряд факторов, которые создают дополнительные сложности, например, различие гранулометрических составов, плотности и других физико-механических характеристик компонентов смеси. Для решения этих проблем необходимо применять высокоэффективное смесительное оборудование, например смесители непрерывного действия центробежного типа [1].

**Цель работы** – разработать алгоритм программы для расчета конструкторско-технологических параметров работы центробежно-шнекового смесителя с возможностью определения качества получаемой смеси на его выходе.

Для решения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработать алгоритм расчета рациональных конструктивных и технологических параметров работы нового центробежно-шнекового смесителя.

2. Разработать программу ЭВМ для определения диаметра шнека  $D$ , производительности  $Q$  и критической частоты вращения шнека  $n_{кр}$  в зависимости от физико-механических параметров компонентов получаемой смеси.

3. Сравнить экспериментальные и теоретические значения коэффициента неоднородности.

### Материалы и методы

Для достижения наилучшего качества смешивания в проектно-конструкторской лаборатории кафедры «Технологическое проектирование пищевых производств» при Кемеровском технологическом институте пищевой промышленности (университете) был разработан центробежно-шнековый смеситель (Пат. № 148608), с перфорированным шнеком для создания рециркулирующих материальных потоков внутри смесителя. Такое конструктивное решение приводит к увеличению накопительной способности и увеличению времени

пребывания в центробежно-шнековом смесителе, что благоприятно сказывается на качестве получаемой смеси [2–6].

Для решения первой задачи нами был проведен литературный анализ, который показал некоторое сходство расчетов различных шнеков для перемещения сыпучих материалов. Нами были взяты за основу расчеты диаметра шнека, производительности и критической частоты вращения шнека, предложенные А.И. Зайцевым, А.Б. Капроновой, А.И. Веселовым, И.А. Веселовой и Р.И. Черкасовым. Итак, на основе этих методов мы предлагаем свой алгоритм расчета [7–12].

Наружный диаметр шнека был рассчитан по формуле:

$$D = \sqrt[3]{\frac{Q}{0,047 \cdot n \cdot K_B \cdot \rho_H \cdot \varphi \cdot K_H}} \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения шнека об/мин;  $K_B=1$  – это частное шага спирали к диаметру шнека;  $\rho_H$  – насыпная плотность смеси т/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – коэффициент заполнения желоба;  $K_H=0,9$  – поправочный коэффициент, зависящий от угла наклона конвейера;  $D$  – диаметр шнека м.

Производительность центробежно-шнекового смесителя можно определить из выражения:

$$Q = 0,047 \cdot D_B^2 \cdot t \cdot n \cdot \rho_H \cdot \varphi \quad (2)$$

где  $\rho_H$  – насыпная плотность;  $t$  – шаг спирали шнека;  $D_B^2$  – диаметр винта шнека

Зная диаметр шнека и производительность можно рассчитать критическую частоту его вращения:

$$n_{кр} = \frac{30}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{D \cdot f_{ж}}} \cdot tg \cdot (\beta + \rho_T) \quad (3)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $f_{ж}$  – коэффициент трения о стенку патрубка.

Дальнейшие конструктивные и режимные параметры центробежно-шнекового смесителя рассчитаны на основе экспериментальных исследований в Кемеровском технологическом институте пищевой промышленности (университет).

Скорость движения  $v$  материалов по поверхности конуса вдоль его образующей, с помощью уравнения регрессии:

$$v = -0,028 + \frac{n_{кр}}{119} + \frac{\gamma}{2500} + \frac{n_{кр} \cdot \gamma}{5000} \quad (4)$$

где  $\gamma$  – угол конусности, выбирается в диапазоне  $\gamma = 70-120^\circ$ .

Затем рассчитываем диаметр верхнего основания конуса  $D_K$  ротора:

$$D_K = \frac{Q}{\pi \cdot \delta \cdot v} \quad (5)$$

где  $\delta$  – толщина слоя материала при его сходе с верхней кромки  $\delta=0,0005 \div 0,0015$ , м.

Длину образующей конуса рекомендуется выбирать в пределах  $l = (0,3 \div 0,4) \cdot D_K$ . При этом точное значение  $l$ , м определяется из компоновочного чертежа ротора смесителя.

Диаметр обечайки смесителя  $D_{об}$ , м можно оценить, увеличив значение диаметра конуса на 15–25 %.

$$D_{об} = D_K \cdot 1,15 \quad (6)$$

Высоту обечайки  $H$ , м определяем из следующего соотношения:

$$H = l_{\max} \cdot 1,3 \quad (7)$$

Для определения зависимости качества смеси от конструктивных и технологических параметров шнека воспользуемся следующим уравнением регрессии:

$$V_C = 0,00068 \cdot n - 0,3 \cdot Z_O + 3,65 \cdot Z_B + 0,002 \cdot n \cdot Z_O - 0,004 \cdot n \cdot Z_B - 0,003 \cdot Z_O \cdot Z_B \quad (8)$$

где:  $V_C$  – коэффициент неоднородности, характеризующий качество получаемой смеси [13];  $Z_O$  – количество отверстий на витках шнека, шт.;  $Z_B$  – количество витков шнека, шт.

Для решения второй задачи была разработана программа ЭВМ (свидетельство № 2017618406) позволяющая произвести конструктивные и технологические расчеты и подобрать рациональные параметры работы шнека и центробежно-шнекового смесителя при перемешивании различных смесей.

### Результаты и обсуждение

Поскольку новая конструкция центробежно-шнекового смесителя была разработана для смешивания различных мучных хлебобулочных смесей, рецептуры которых представлены в таблице 1, то для примера воспользуемся смесью № 1 для расчета рациональных параметров работы перфорированного шнека аппарата на разработанной программе ЭВМ. Для этого необходимо ввести физико-механические характеристики компонентов смеси № 1 в исходные данные диалогового окна разработанной программы ЭВМ.

Таблица 1.

Рецептуры 300 г мучных хлебопекарных смесей

Table 1.

Recipes 300 g of flour bakery mixes

Наименование ингредиентов, г Name of Ingredients, gm	Смесь № 1 Mixture № 1	Смесь № 2 Mixture № 2	Смесь № 3 Mixture № 3
Мука пшеничная первого сорта Wheat Flour Extra Class	220,0	130,0	143,0
Овсяные отруби Oat bran	27,0	–	–
Нуговая мука Nut Flour	19,0	–	–
Соль пищевая Food salt	4,0	4,0	5,0
Сахар-песок Sugar-sand	11,0	11,0	–
Мука пшеничная цельнозерновая Whole wheat flour	–	130,0	–
Сухое обезжиренное молоко Skimmed milk powder	–	8,0	–
Семена льна Flax seeds	–	10,0	–
Мука ржаная Rye flour	–	–	83,0
Гречневая мука Buck wheat flour	–	–	41,4
Лук сушеный Dried onion	–	–	19,3

Поскольку данная смесь состоит из пяти ингредиентов, то в диалоговом окне программы вводится количество материалов смеси равное пяти. Затем в всплывающее окно вводим необходимые ингредиенты, после ввода каждого из них программа автоматически показывает

плотность, диаметр частиц и структуру каждого компонента. Нажав кнопку «Смешать» программа считает средний показатель насыпной плотности, диаметр частиц смеси и выводит их на экран (рисунок 1).

**Расчет параметров шнека**

Количество материалов в смеси: 5

Компонент смеси 1: Мука пшеничная  $\rho = 640 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,18 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 2: Мука пшеничная  $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,2 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 3: Овсяные отруби  $\rho = 270 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=3 \text{ мм}$ ; крупнозернистая стр.

Компонент смеси 4: Соль  $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

Компонент смеси 5: Сахарный песок  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

**Насыпная плотность смеси ( $\rho_n$ ), кг/м<sup>3</sup>**: 732

Коэффициент заполнения желоба ( $\beta$ ), в зависимости от структуры смеси: 0,348

Средний диаметр частиц смеси, мм: 0,876

Предполагаемый диаметр шнека ( $D_0$ ), м: [ ]

Шаг витка спирали ( $t$ ), м: [ ]

Число оборотов ( $n$ ), об/мин: [ ]

**Производительность ( $Q$ ), кг/ч**: [ ]

Критическая частота вращения ( $n_{кр}$ ), об/мин: [ ]

Минимальная производительность, кг/ч: [ ]

Максимальная производительность, кг/ч: [ ]

Минимальная частота вращения, об/мин: [ ]

Максимальная частота вращения, об/мин: [ ]

Вид груза ( $K_0$ ): [ ]

Угол наклона конвейера ( $\beta$ ), град: [ ]  $K_n = 0,95$

**Диаметр шнека ( $D$ ), м**: [ ]

Рисунок 1. Определение средних показателей смеси  
Figure1. Determination of the average mixture

Задавшись предположительным диаметром шнека, например 0,2 м, можно рассчитать производительность шнека, нажав кнопку «Расчитать производительность» (рисунок 2).

По известной производительности можно рассчитать диаметр шнека  $D$  нажав кнопку «Расчитать диаметр» (рисунок 3).

Зная диаметр  $D$  и производительность  $Q$ , определяем критическую частоту вращения

шнека  $n_{кр}$ , нажав кнопку «Расчитать критическую частоту вращения» (рисунок 4).

В заключении данная программа позволяет получить графическую зависимость диаметра шнека от производительности и его критической частоты вращения, представленную на рисунке 5 (для смеси № 1).

**Расчет параметров шнека**

Количество материалов в смеси: 5

Компонент смеси 1: Мука пшеничная  $\rho = 640 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,18 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 2: Мука пшеничная  $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,2 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 3: Овсяные отруби  $\rho = 270 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=3 \text{ мм}$ ; крупнозернистая стр.

Компонент смеси 4: Соль  $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

Компонент смеси 5: Сахарный песок  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

**Насыпная плотность смеси ( $\rho_n$ ), кг/м<sup>3</sup>**: 732

Коэффициент заполнения желоба ( $\beta$ ), в зависимости от структуры смеси: 0,348

Средний диаметр частиц смеси, мм: 0,876

Предполагаемый диаметр шнека ( $D_0$ ), м: 0,02

Шаг витка спирали ( $t$ ), м: 0,02

Число оборотов ( $n$ ), об/мин: 500

**Производительность ( $Q$ ), кг/ч**: 47,890368

Критическая частота вращения ( $n_{кр}$ ), об/мин: [ ]

Минимальная производительность, кг/ч: [ ]

Максимальная производительность, кг/ч: [ ]

Минимальная частота вращения, об/мин: [ ]

Максимальная частота вращения, об/мин: [ ]

Вид груза ( $K_0$ ): [ ]

Угол наклона конвейера ( $\beta$ ), град: [ ]  $K_n = 0,95$

**Диаметр шнека ( $D$ ), м**: [ ]

Рисунок 2. Расчет производительности шнека  
Figure 2. Calculation of screw performance

**Расчет параметров шнека**

Количество материалов в смеси: 5

Компонент смеси 1: Мука пшеничная  $\rho = 640 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,18 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 2: Мука пшеничная  $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,2 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 3: Овсяные отруби  $\rho = 270 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=3 \text{ мм}$ ; крупнозернистая стр.

Компонент смеси 4: Соль  $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

Компонент смеси 5: Сахарный песок  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

**Насыпная плотность смеси ( $\rho_n$ ), кг/м<sup>3</sup>**: 732

Коэффициент заполнения желоба ( $\beta$ ), в зависимости от структуры смеси: 0,348

Средний диаметр частиц смеси, мм: 0,876

Предполагаемый диаметр шнека ( $D_0$ ), м: 0,02

Шаг витка спирали ( $t$ ), м: 0,02

Число оборотов ( $n$ ), об/мин: 500

**Производительность ( $Q$ ), кг/ч**: 47,890368

Критическая частота вращения ( $n_{кр}$ ), об/мин: [ ]

Минимальная производительность, кг/ч: [ ]

Максимальная производительность, кг/ч: [ ]

Минимальная частота вращения, об/мин: [ ]

Максимальная частота вращения, об/мин: [ ]

Вид груза ( $K_0$ ): 1

Угол наклона конвейера ( $\beta$ ), град: 5  $K_n = 0,95$

**Диаметр шнека ( $D$ ), м**: 0,020344895363822

Рисунок 3. Расчет диаметра шнека  
Figure3. Calculation of the screw diameter.

**Расчет параметров шнека**

Количество материалов в смеси: 5

Компонент смеси 1: Мука пшеничная,  $\rho = 640 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,18 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 2: Мука нутовая,  $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,2 \text{ мм}$ ; порошкообразная стр.

Компонент смеси 3: Осевые отруби,  $\rho = 270 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=3 \text{ мм}$ ; крупнозернистая стр.

Компонент смеси 4: Соль,  $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

Компонент смеси 5: Сахарный песок,  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $d=0,5 \text{ мм}$ ; мелкозернистая стр.

Насыпная плотность смеси ( $\rho_n$ ),  $\text{кг/м}^3$ : 732

Кoeffициент заполнения желоба ( $f_l$ ), в зависимости от стоктвобы смеси: 0,348

Средний диаметр частиц смеси,  $\text{мм}$ : 0,876

Предполагаемый диаметр шнека ( $D_0$ ),  $\text{м}$ : 0,02

Шаг витка спирали ( $t$ ),  $\text{м}$ : 0,02

Число оборотов ( $n$ ),  $\text{об/мин}$ : 500

Производительность ( $Q$ ),  $\text{кг/ч}$ : 47,890368

Кoeffициент свободного падения ( $g$ ),  $\text{м/с}^2$ : 9,8

Кoeffициент трения материала о желоб ( $f_{ж}$ ): 0,2

Угол наклона витка шнека (бетта), град: 25

Кoeffициент трения материала о винтовую поверхность ( $f_{в}$ ): 0,2

Критическая частота вращения ( $n_{кр}$ ),  $\text{об/мин}$ : 456,4994236078

Минимальная производительность,  $\text{кг/ч}$ : 10

Максимальная производительность,  $\text{кг/ч}$ : 100

Минимальная частота вращения,  $\text{об/мин}$ : 100

Максимальная частота вращения,  $\text{об/мин}$ : 1000

Вид груза (Кв): 1

Угол наклона конвейера (бетта), град: 5,  $K_n = 0,95$

Диаметр шнека ( $D$ ),  $\text{м}$ : 0,020344895363822

Кнопки: Смесить, Рассчитать производительность, Рассчитать критическую частоту вращения, Рассчитать диаметр, Рассчитать данные для графика

Рисунок 4. Расчет критической частоты вращения шнека.

Figure 4. Calculation of the critical screw speed.

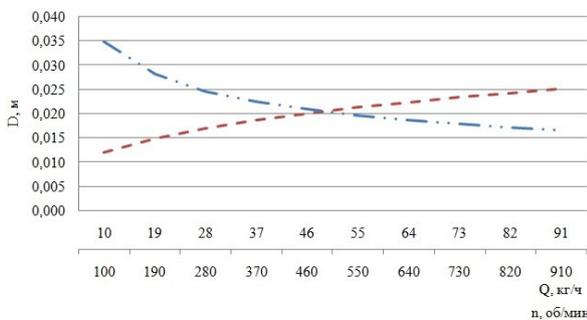


Рисунок 5. График зависимости диаметра шнека от производительности(–) и критической частоты вращения шнека (---).

Figure 5. Graph of screw diameter versus performance (–) and the critical screw speed (---).

Из рисунка 5 видно, что диаметр шнека увеличивается с возрастанием производительности аппарата и уменьшается с повышением критической частоты вращения шнека [14–16]. Пересечение двух кривых образует точку, которая показывает рациональные параметры работы шнека центробежно-шнекового смесителя при переработке смеси № 1, а именно: диаметр шнека  $D=0,2 \text{ м}$ , его частота вращения  $n=500 \text{ об/мин}$  и производительность  $Q=50 \text{ кг/ч}$ .

Далее по полученным численным данным программы ЭВМ и представленной выше методике расчета центробежно-шнекового смесителя приведены следующие конструктивные и технологические параметры.

По принятому углу конусности  $\gamma = 70^\circ$  и найденной критической частоте вращения  $n_{кр} = 456 \text{ об/мин}$ , находим скорость движения  $v$ ,  $\text{м/с}$  материалов по поверхности конуса:

$$v = -0,028 + \frac{456}{119} + \frac{70}{2500} + \frac{456 \cdot 70}{5000} = 10,21 \quad (9)$$

Затем зная производительность  $Q=47,9 \text{ кг/ч}$  и скорость движения материалов по поверхности конуса, рассчитываем диаметр конуса  $D_K$ ,  $\text{м}$  смесителя:

$$D_K = \frac{0,013}{3,14 \cdot 0,0010 \cdot 10,21} = 0,4 \quad (10)$$

Затем находим диаметр обечайки:

$$D_{OB} = 0,4 \cdot 1,15 = 0,46 \quad (11)$$

Зная  $l$  и  $D_K$  определим высоту обечайки:

$$H = 0,12 \cdot 1,3 = 0,156 \quad (12)$$

Ранее экспериментально определены значения коэффициентов неоднородности  $V_C$  в зависимости от количества отверстий на витках шнека  $Z_0$  и количестве витков шнека  $Z_B$ , которые показали, что для получения смесей хорошего качества необходимо, чтобы шнек имел следующие конструктивные параметры  $Z_0 = (4-8)$ ,  $Z_B = (2-4)$ . Подставив, эти величины и найденную критическую частоту вращения шнека и ротора в (8), получим несколько коэффициентов неоднородности соответствующим данным переменным величинам.

$$V_C = 0,00068 \cdot 456 - 0,3 \cdot 4 + 3,65 \cdot 2 + 0,002 \cdot 456 \cdot 4 - 0,004 \cdot 456 \cdot 2 - 0,003 \cdot 4 \cdot 2 = 6,38 \quad (13)$$

$$V_C = 0,00068 \cdot 456 - 0,3 \cdot 4 + 3,65 \cdot 4 + 0,002 \cdot 456 \cdot 4 - 0,004 \cdot 456 \cdot 4 - 0,003 \cdot 4 \cdot 4 = 10,01 \quad (14)$$

$$V_C = 0,00068 \cdot 456 - 0,3 \cdot 8 + 3,65 \cdot 2 + 0,002 \cdot 456 \cdot 8 - 0,004 \cdot 456 \cdot 2 - 0,003 \cdot 8 \cdot 2 = 8,81 \quad (15)$$

$$V_c = 0,00068 \cdot 456 - 0,3 \cdot 8 + 3,65 \cdot 4 + 0,002 \cdot 456 \cdot 8 - 0,004 \cdot 456 \cdot 4 - 0,003 \cdot 8 \cdot 4 = 12,41 \quad (16)$$

Для решения третьей задачи определили адекватность регрессионных уравнений (13–16), сравнив численные значения коэффициентов неоднородности, полученные с их помощью

и экспериментально (таблица 2). Помимо этого в таблице 2, приведены значения относительной погрешности расчетов коэффициентов неоднородности определенной по формуле:

$$\Delta V_c = \frac{|V_c^{Эксп} - V_c^{Расч}|}{V_c^{Эксп}} \cdot 100\% \quad (17)$$

Таблица 2. Сравнение численных значений коэффициента неоднородности, полученных экспериментально и на основе регрессионных уравнений

Table 2. Comparison of the numerical values of the in homogeneity coefficient, obtained experimentally and on the basis of regression equations

Данные Information	Экспериментальное $V_c$ , % Experimental $V_c$ , %	Полученные при помощи регрессионного уравнения $V_c$ , % Derived using the regression equation $V_c$ , %	Относительная погрешность $\Delta V_c$ , % Relative error $\Delta V_c$ , %
N =456; $Z_O$ =4; $Z_B$ =2	5,92	6,38	7,77
N =456; $Z_O$ =4; $Z_B$ =4	8,56	10,01	16,93
N =456; $Z_O$ =8; $Z_B$ =2	9,37	8,81	5,97
N =456; $Z_O$ =8; $Z_B$ =4	11,21	12,41	10,79
Среднее значение   Average value			10,365

Из таблицы 2 видно, что относительная погрешность для каждого случая находится в пределах допустимых инженерных измерений, следовательно, полученные регрессионные уравнения можно применять для предсказания значений зависимой переменной  $V_c$  в рамках диапазона исследуемых величин. Поскольку среднее значение относительной погрешности не превышает 10,36%, то, приведенный алгоритм расчета центробежно-шнекового смесителя может быть с высокой степенью точности применен для его конструкторского и технологического расчета.

### Заключение

1. Предложенный алгоритм позволяет определить с высокой степенью точности рациональные конструктивные и технологические

параметры нового центробежно-шнекового смесителя, а так же качество получаемой на нём смеси.

2. Разработанная программа ЭВМ позволяет рассчитать рациональные параметры работы перфорированного шнека в зависимости от количества смешиваемых ингредиентов и их физико-механических характеристик.

3. Сравнение экспериментальных и полученных при помощи уравнений регрессий значений коэффициента неоднородности показали, что приведенный алгоритм расчета центробежно-шнекового смесителя может быть с высокой степенью точности применен для его конструктивного и технологического расчета.

### ЛИТЕРАТУРА

1 Бородулин Д.М., Иванец В.Н., Киселев Д.И., Андрушкова Е.А. и др. Разработка центробежно-шнекового смесителя для получения сухих комбинированных смесей для питания спортсменов // Хранение и переработка сельхозсырья. 2015. № 3. С. 53–56

2 Sato A., Serris E., Grosseau P., Thomas G. et al. Effect of operating condition on dry particle coating in a high shear mixer // Powder Technol. 2012. № 229. P. 97–103.

3 Sarkar A., Wassgren C. Continuous blending of cohesive granular material // ChemEngSci. 2010. № 65. P. 5687–5698

4 Huang A.-N., Kuo H.-P. Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems – A review // AdvPowderTechnol. 2014. № 25. P. 163–173.

5 Jajcevic D., Siegmann E., Radeke C. Large-scale CFD–DEM simulations of fluidized granular systems // ChemEngSci. 2013. № 98. P. 298–310.

6 Borodulin D.M. Sukhorukov D.V. Ways of intensifying the mixing process in a continuously operating centrifugal mixers for producing dry combination products // I International Conference «Global Science and Innovation». 2013. V. I. P. 392-396.

7 Воронин В.В., Адигамов К.А., Петренко С.С., Сизякин Р.А. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов. // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2012. № 4–2. С. 36.

8 Петренко С.С. Определение конструктивных параметров шнекового смесителя сыпучих материалов. // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. № 1.

9 Петренко С.С., Адигамов К.А. Шнековый смеситель сыпучих материалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. № 5. С. 52–53.

10 Черкасов Р.И. Методика и алгоритм расчетов

параметров вертикального шнека смесителя сыпучих материалов // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 8–1. С. 79–82.

11 Черкасов Р.И., Адигамов К.А., Воронин В.В., Гапон Н.В. и др. Оценка качества сыпучих материалов с различным размером фракций // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 2–2. С. 169.

12 Черненко Г.В., Байбара С.Н., Адигамов К.А. Обоснование оптимального шага навивки спирали и частоты вращения вертикального шнекового конвейера // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. Научно-технический журнал. 2012. № 2/2 (280). С. 9–11.

13 Бородулин Д.М., Будрик В.Г., Сухоруков Д.В., Саблинский А.И. и др. Исследование эффективности практического применения центробежных смесителей непрерывного действия в технологических линиях производства комбинированных продуктов питания // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 3–1. С. 9–13.

14 Андриушков А.А., Сухоруков Д.В., Злобин С.В. Определение рациональных параметров работы винтового смесителя вибрационного типа // В сборнике: *Явление переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств материалы II Международной научно-практической конференции*. 2016. С. 132–135.

15 Сухоруков Д.В. Разработка новых технологий производства комбинированных продуктов питания с использованием центробежных смесителей непрерывного действия // В книге: *Продовольственная безопасность Тезисы работ финалистов Международного конкурса научно-исследовательских проектов молодых ученых и студентов. VII Евразийский экономический форум молодежи*. 2016. С. 73–75.

16 Коломникова Я.П., Дерканосова А.А., Мануковская М.В., Литвинова Е.В. Влияние нетрадиционного растительного сырья на биотехнологические свойства и структуру сдобного теста // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2015. № 3 (65). С. 157–160.

## REFERENCES

1 Borodulin D.M., Ivanets V.N., Kiselev D.I., Andryushkova E.A. et al. The development of a centrifugal-screw mixer for obtaining dry composite mixtures for the nutrition of athletes. *Khranenie I pererabotka sel'khozsyrya*. [Storage and processing of agricultural raw materials] 2015. no. 3. pp. 53–56 (in Russian)

2 Sato A., Serris E., Grosseau P., Thomas G. et al. Effect of operating conditions on dry particle coating in a high shear mixer. *Powder Technol.* 2012. no. 229. pp. 97–103.

3 Sarkar A., Wassgren C. Continuous blending of cohesive granular material. *ChemEngSci.* 2010. no. 65. pp. 5687–5698

4 Huang A.-N., Kuo H.-P. Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems – A review. *AdvPowderTechnol.* 2014. no. 25. pp. 163–173.

5 Jajcevic D., Siegmann E., Radeke C. Large-scale CFD–DEM simulations of fluidized granular systems. *ChemEngSci.* 2013. no. 98. pp. 298–310.

6 Borodulin D.M. Sukhorukov D.V. Ways of intensifying the mixing process in a continuously operating centrifugal mixers for producing dry combination products. I International Conference «Global Science and Innovation». 2013. vol. I. pp. 392–396.

7 Voronin V.V., Adigamov K.A., Petrenko S.S., Sizyakin R.A. Criteria and methods for assessing the quality of mixing of bulk materials. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona»* [Engineering bulletin of Don] 2012. no. 4–2. pp. 36. (in Russian)

8 Petrenko S.S. Determination of the design parameters of a screw mixer for bulk materials] *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy vestnik Dona»* [Engineering bulletin of Don] 2013. no. 1. (in Russian)

9 Petrenko S.S., Adigamov K.A. Screw mixer for loose materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskienauki*. [Proceedings of universities] 2012. no. 5. pp. 52–53 (in Russian)

10 Cherkasov R.I. Method and algorithm for calculating the parameters of a vertical auger of bulk material mixer. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research] 2015. no. 8–1. pp. 79–82. (in Russian)

11 Cherkasov R.I., Adigamov K.A., Voronin V.V., Gapon N.V. et al. Evaluation of the quality of bulk materials with different size fractions. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education] 2015. no. 2–2. pp. 169. (in Russian)

12 Chernenko G.V. The rationale for the optimal spiral winding pitch and the speed of the vertical screw conveyor. *Fundamental'nye I prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. [Fundamental and applied problems of technology and technology] 2012. no. 2/2 (280). pp. 9–11. (in Russian).

13 Borodulin D.M., Budrik V.G., Sukhorukov D.V., Sablinskiy A.I. et al. Study of the effectiveness of the practical application of centrifugal continuous mixers in production lines of combined food products. *Sovremennyye naukoemkiye tekhnologii*. [Modern high technology.] 2016. no. 3–1. pp. 9–13. (in Russian).

14 Andriushkov A.A., Suhorukov D.V., Zlobin S.V. Determination of the rational parameters of the operation of a screw mixer of vibration type. In the collection. *Yavleniya perenosa v protsessakh I apparatakh* [The phenomenon of transfer in the processes and apparatus of chemical and food production materials II International Scientific and Practical Conference]. 2016. pp. 132–135. (in Russian)

15 Suhorukov D.V. Development of new technologies for the production of combined food products using centrifugal mixers of continuous operation. V knige: *Prodovol'stvennaya bezopastnost' Tezisy rabot finalistov Mezhdunarodnogo konkursa nauchno-issledovatel'skih projektov molodyhuchen yhstudentov. VII Evrazijskiy ekonomicheskiy forum molodezhi* [Food safety The theses of works of finalists of the International competition of scientific research projects of young scientists and students. VII Eurasian Economic Forum of Youth] 2016. pp. 73–75. (in Russian)

16 Kolomnikova Y.P., Derkanosova A.A., Manukovskaya M.V., Litvinova E.V. Effect of non-traditional vegetable raw materials on the properties and biotechnological structure pastry. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET] 2015. no. 3. pp. 157–160. (in Russian).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Дмитрий М. Бородулин** д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, borodulin\_dmitri@list.ru

**Дмитрий И. Киселев** к.т.н., аспирант, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, eidos-92@mail.ru

**Мargarita Т. Шулбаева** к.т.н., доцент, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, 650056, Россия, sh-m-t@yandex.ru

**Елена А. Вагайцева** к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, vagaitseva@mail.ru

**Антон В. Шафрай** к.т.н., старший преподаватель, кафедра технологического проектирования пищевых производств, Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет), б-р Строителей, 47, г. Кемерово, Россия, shafraia@mail.ru

**КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА**

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**ПОСТУПИЛА 17.01.2018**

**ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 09.02.2018**

**INFORMATION ABOUT AUTHORS**

**Dmitrij M. Borodulin** Dr. Sci. (Engin.), head of the department, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia, borodulin\_dmitri@list.ru

**Dmitrij I. Kiselev** Cand. Sci. (Engin.), graduate student, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia, eidos-92@mail.ru

**Margarita T. Shulbaeva** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), Boulevard Stroiteley, 47, Kemerovo, 650056, Russia, sh-m-t@yandex.ru

**Elena A. Vagaitseva** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, vagaitseva@mail.ru

**Anton V. Shafrai** Cand. Sci. (Engin.), associate, technological design of food production department, Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Stroiteley Boulevard, 47, Kemerovo, 650056, Russia, shafraia@mail.ru

**CONTRIBUTION**

All authors equally participated in writing the manuscript and responsible for the plagiarism

**CONFLICT OF INTEREST**

The authors declare no conflict of interest.

**RECEIVED 1.17.2018**

**ACCEPTED 2.9.2018**