

Определение ключевых параметров работы вибрационного смесителя при получении мучных хлебопекарных смесей

Д. М. Бородулин¹, Т. В. Зорина^{1,*}, В. Н. Иванец¹, Е. В. Невская²,
О. Е. Тюрина², А. Е. Борисова²

¹ ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»,
650043, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6

² ФГАНУ «Научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности»,
107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, 26А

Дата поступления в редакцию: 29.02.2019
Дата принятия в печать: 28.03.2019

*e-mail: tanya.kaznacheeva.92@mail.ru



© Д. М. Бородулин, Т. В. Зорина, В. Н. Иванец, Е. В. Невская, О. Е. Тюрина, А. Е. Борисова, 2019

Аннотация. Питание является одним из важнейших факторов, определяющих здоровье общества. Особое внимание уделяется качеству продукта и наличию в нем ценных веществ. Поэтому для определения ключевых параметров работы смесителя была подобрана мучная хлебопекарная смесь с высоким содержанием белка. Известно много работ, посвященных получению мучных хлебопекарных смесей на смесителях различного типа. В связи с этим нами была предпринята попытка получить данные смеси на оригинальном вибрационном смесителе непрерывного действия. В рамках исследования целесообразности приготовления в исследуемом смесителе мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка экспериментально определяли скорость ее вибротранспортирования по рабочему органу аппарата. При определении эффективности процессов смешивания, кроме скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси, важное значение имеет потребляемая мощность аппарата. Поэтому также были проведены исследования по определению взаимного влияния технологических параметров смесителя на потребляемую мощность. Анализ полученных результатов исследования по определению влияния ключевых параметров на скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси ν показал, что она возрастает с увеличением частоты колебаний рабочего органа f и амплитуды колебаний A . Кроме того, в ходе исследований выяснилось, что чем выше амплитуда и частота колебаний, тем больше значение потребляемой мощности вибросмесителя. В результате были определены его ключевые параметры работы при получении мучных хлебопекарных смесей: амплитуда вибрации $A = 0,0035$ м, угол вибрации $\beta = 45^\circ$, высота виброкипящего слоя $0,02$ м, диаметр перфорации рабочего органа аппарата $d = 0,007$ м.

Ключевые слова. Вибрационный смеситель, мучная хлебопекарная смесь, скорость вибротранспортирования, потребляемая мощность

Для цитирования: Определение ключевых параметров работы вибрационного смесителя при получении мучных хлебопекарных смесей / Д. М. Бородулин, Т. В. Зорина, В. Н. Иванец [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 1. – С. 77–84.
DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-77-84>.

Original article

Available online at <http://fppt.ru/>

Key Operation Parameters of the Vibration Mixer in the Production of Flour Baking Mixes

D.M. Borodulin¹, T.V. Zorina^{1,*}, V.N. Ivanets¹, E.V. Nevskaya²,
O.E. Turina², A.E. Borisova²

¹ Kemerovo State University,
6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650043, Russia

² Scientific Research Institute for the Baking Industry,
26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia

Received: February 29, 2019
Accepted: March 28, 2019

*e-mail: tanya.kaznacheeva.92@mail.ru



© D.M. Borodulin, T.V. Zorina, V.N. Ivanets, E.V. Nevskaya, O.E. Turina, A.E. Borisova, 2019

Abstract. Food is one of the major health-determining factors. Thus, any product should be of high quality and contain valuable substances. Therefore, the authors selected a flour baking mix with a high content of protein to determine the key operation parameters of the vibration mixer. There have been a lot of researches that feature flour baking mixes with the help of various

mixers. The present research employed an original vibration mixer of continuous action with a method of “consecutive dilution”. The experiment determined the speed of vibrotransportation of the protein mix through the operating part of the device. The power consumption of the device, as well as the speed of the vibrotransportation of the baking mix, can affect the process of mixing. Therefore, the authors studied the mutual impact of the technological parameters of the mixer and the power consumption. The analysis helped to determine the effect of the key parameters on the speed of vibrotransportation of the flour baking mix. The speed v increased with the increase in the oscillation frequency of the operating part f and the vibration amplitude A . A high amplitude and oscillation frequency proved to increase the value of power consumption of the vibromixer. Its key operation parameters were as follows: the amplitude of vibration $A = 0.0035$ m, the angle of vibration $\beta = 45^\circ$, the height of the vibroboiling layer = 0.02 m, the diameter of perforation of the operating part of the device $d = 0.007$ m.

Keywords. Vibrating mixer, baking flour mixture, vibration transport speed, power consumption

For citation: Borodulin DM, Zorina TV, Ivanets VN, Nevskaya EV, Turina OE, Borisova AE. Key Operation Parameters of the Vibration Mixer in the Production of Flour Baking Mixes. Food Processing: Techniques and Technology. 2019;49(1):77–84. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-1-77-84>.

Введение

Питание является одним из важнейших факторов, определяющих здоровье общества. Особое внимание обращается на качество пищевых продуктов. Важным органическим веществом в организме человека является белок, необходимый для формирования и восстановления мышц, волос, ногтей, кожи и внутренних органов. Он выполняет огромное количество функций, которые поддерживают здоровье всего организма. Исходя из этого, для проведения исследований по определению ключевых параметров работы вибрационного смесителя была подобрана мучная хлебопекарная смесь с высоким содержанием белка.

При производстве сухих мучных смесей одной из основных проблем является равномерное распределение компонентов, вносимых в небольших количествах, по всему объему готового продукта. Решение данной проблемы – использование вибрационных смесителей из-за их простоты, достаточной эффективности смешивания и ценовых характеристик [1–5]. Исследование работы вибрационных смесителей непрерывного действия является актуальной научной задачей, представляющей большой народно-хозяйственный интерес для пищевой промышленности [6–8].

Целью данной работы является определение ключевых параметров работы вибрационного смеси-

теля для получения мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка заданного качества.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследований процесса смешивания мучной хлебопекарной смеси был использован оригинальный вибрационный смеситель непрерывного действия [9].

Проанализировав рынок отечественного и зарубежного сырья, для экспериментальных исследований были подобраны рецептурные компоненты с содержанием белка не менее 30 г на 100 г продукта: изолят сывороточного белка (95 г белка в 100 г продукта), изолят соевого белка (90 г белка в 100 г продукта), сухая пшеничная клейковина (78 г белка в 100 г продукта), кунжутная мука (30 г белка в 100 г продукта) [10–13]. Для проведения расчетов пищевой ценности была использована методика, разработанная на базе Федерального государственного автономного научного учреждения «Научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности». В соответствии с приложением 2 к ТР ТС 022/2011 рекомендуемый уровень суточного потребления белка составляет 75 г. В приложении 4 к ТР ТС 022/2011 приведена таблица коэффициентов пересчета энергетической ценности основных пищевых веществ пищевой продукции согласно которой в 1 г белка содержится 4 ккал или 17 кДж [14]. Таким образом, была смоделирована рецептура мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка с учетом всех вышеперечисленных требований, которая представлена в таблице 1.

По результатам расчета пищевой ценности содержание белка в изделиях составило 14,5 %, т. е. 19,2 % от суточной потребности, 22,0 % энергетической ценности (калорийности) пищевой продукции.

В рамках исследования целесообразности приготовления в смесителе подобранной мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка экспериментально определяли скорость ее вибротранспортирования по рабочему органу вибрационного смесителя. Она оказывает существенное влияние на производительность смесителя, его геометрические параметры и зависит от угла β , амплитуды A и частоты f вибрации, а также от высоты виброкипящего слоя (ВКС) и наличия перфорации на рабочем органе вибрационного смесителя.

Таблица 1 – Рецептура мучной хлебопекарной смеси с высоким содержанием белка и дисперсность её ингредиентов

Table 1 – Recipe flour baking mixture with a high protein content and the dispersion of its ingredients

Наименование сырья	Расход сырья, кг	Дисперсность, м ⁻¹
Мука пшеничная хлебопекарная первого сорта	83,7	16000–25000
Соль пищевая	1,3	300–500
Сахар белый	1,7	500–700
Кунжутная мука	4,2	11000–16000
Изолят сывороточного белка	4,2	10000–20000
Изолят соевого белка	4,2	10000–20000
Клейковина сухая	0,8	5500–6500
Итого:	100,0	–

Руководствуясь следующей методикой [15], были проведены исследования по определению скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу аппарата.

1. Определяли среднюю длину пути перемещения компонентов мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу аппарата по следующей формуле:

$$l_{\text{срi}} = \frac{2 \times \pi \times (D_{\text{н}} + D_{\text{вн}})}{4 \times \cos \gamma}, \quad (1)$$

где $l_{\text{срi}}$ – средняя длина пути, м;

$D_{\text{н}}$ – наружный диаметр рабочего органа, м;

$D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр рабочего органа, м;

γ – угол наклона винтового рабочего органа.

В данном случае путь – это длина поверхности, по которой двигалась мучная хлебопекарная смесь;

2. Устанавливали ключевые параметры работы вибрационного смесителя и выводили его на стационарный режим;

3. Вносили частицу-индикатор (подкрашенная крупица пищевой соли) в поток мучной хлебопекарной смеси и замеряли время её прохождения по рабочему органу вибрационного смесителя №

4. Определяли скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу аппарата по формуле:

$$v_{\text{срi}} = \frac{l_{\text{срi}}}{t_{\text{ли}}}, \quad (2)$$

где $v_{\text{срi}}$ – это скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу аппарата, м/с; $t_{\text{ли}}$ – это время прохождения частицы-индикатора по рабочему органу вибрационного смесителя, с.

Затем были проведены исследования по определению взаимного влияния технологических параметров смесителя на потребляемую мощность. Исследование поочередно проводилось на двух конструкциях вибрационного смесителя непрерывного действия, выполненных по патенту № 2626415 и отличающихся только количеством витков рабочего органа, а следовательно и его массой [9]. В первом случае смеситель состоял из 4 витков рабочего органа (масса составляла 16,5 кг), а во втором 8 (масса составляла 25,5 кг). Исследования по определению взаимного влияния технологических параметров смесителя на потребляемую мощность проводились следующим образом:

1. Вибрационный смеситель подключали к амперметру, вольтметру и ваттметру;

2. Устанавливали ключевые параметры работы аппарата (амплитуду A и частоту f вибрации) и выводили его на стационарный режим работы;

3. Производили замеры напряжения (U , В) и силы тока (I , А), потребляемых электродвигателем смесителя;

4. По полученным данным производили расчет значений потребляемой мощности по формуле:

$$N = I \times U, \quad (3)$$

где N – потребляемая мощность, Вт;

I – сила тока, А;

U – напряжение, В.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведения исследования по определению скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу вибрационного смесителя в качестве ключевых были использованы параметры: угол вибрации ($\beta = 30; 45$ и 60°), амплитуда ($A = 0,0025; 0,0035$ и $0,0045$ м), частота колебаний дебалансов ($f = 16,66; 21; 25; 29$ и $33,33$ Гц), высота виброкипящего слоя (ВКС = $0,02; 0,03$ и $0,04$ м), перфорация ($d = 0,005; 0,007$ м; без перфорации).

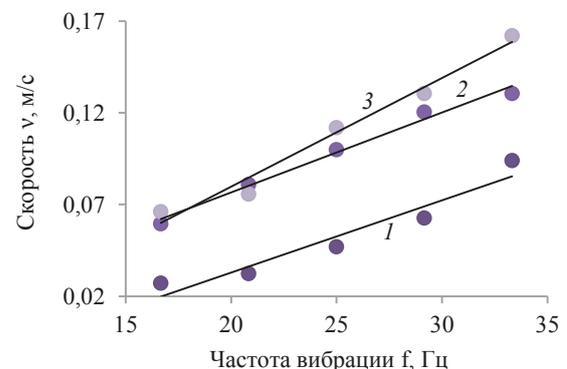
Результаты исследований по определению скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу смесителя отображены на рисунках 1–4 и в виде аналитических уравнений.

На рисунке 1 представлена группа линий, отражающих влияние амплитуды A и частоты f колебаний на скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу аппарата (угол вибрации $\beta = 45^\circ$, высота ВКС $0,02$ м, перфорация отсутствует).

Из рисунка 1 видно, что наибольшие значения скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу аппарата наблюдается при $A = 0,0045$ м, а наименьшие при $A = 0,0025$ м. Соответственно, чем больше амплитуда A и частота вибрации f , тем выше скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси v . Амплитуда отвечает за отрывание материала на определенную высоту от плоскости, тем самым способствуя лучшему продвижению смеси по рабочему органу аппарата. Следовательно, для интенсификации процесса смешивания мучной хлебопекарной смеси и увеличения производительности аппарата необходимо увеличивать данные параметры. Аппроксимирующие уравнения полученных линий имеют вид:

$$v_1 = 0,003 f - 0,045 \quad (A = 0,0025 \text{ м}), \quad (4)$$

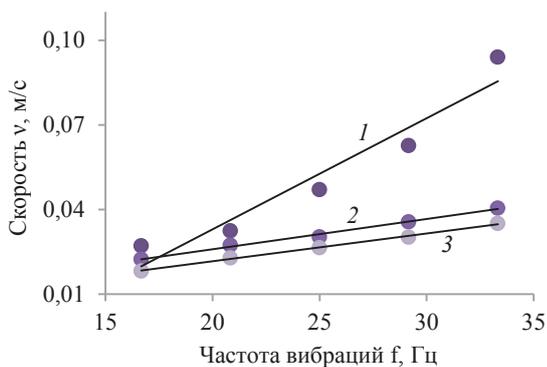
$$v_2 = 0,004 f - 0,01 \quad (A = 0,0035 \text{ м}), \quad (5)$$



(1) $A = 0,0025$ м (2) $A = 0,0035$ м (3) $A = 0,0045$ м

Рисунок 1 – Графическая зависимость скорости перемещения мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу от амплитуды (A) и частоты вибрации (f)

Figure 1 – Characteristic curve of the effect of the amplitude (A) and frequency of vibration (f) on the path velocity of the flour baking mixture



(1) ВКС = 0,02 м (2) ВКС = 0,03 м (3) ВКС = 0,04 м

Рисунок 2 – Графическая зависимость скорости перемещения мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу от высоты ВКС и частоты вибрации (f)

Figure 2 – Characteristic curve of the effect of the vibroboil height and the frequency of vibration (f) on the path velocity of the flour baking mix

$$v_3 = 0,005 f - 0,038 \quad (A = 0,0045 \text{ м}). \quad (6)$$

На рисунке 2 представлена группа линий, отражающих влияние высоты ВКС и частоты f вибрации на скорость (угол вибрации $\beta = 45^\circ$, амплитуда вибрации $A = 0,0045$ м, перфорация отсутствует).

Из рисунка 2 видно, что наибольшая скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси наблюдается при ВКС равном 0,02 м, а наименьшая при 0,04 м. Можно сделать вывод: чем выше частота вибрации f и ниже ВКС, тем выше скорость вибротранспортирования исследуемой смеси. Это объясняется следующим: под действием вибрации частицы слоя мучной хлебопекарной смеси начинают двигаться вверх. В этот момент под слоем образуется разрежение, за счет чего происходит подсосывание воздуха через отверстие. ВКС смеси захватывает воздух снизу и вытесняет его вверх, являясь подобием «насоса», транспортирующим воздух через себя. Воздух, проникающий под слой материала через перфорацию, «запирает» отверстия и ухудшает истечение дисперсной фазы через них. Соответственно, чем выше ВКС материала, тем лучше истечение смеси через перфорацию и ниже скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси. Аппроксимирующие уравнения построенных линий имеют вид:

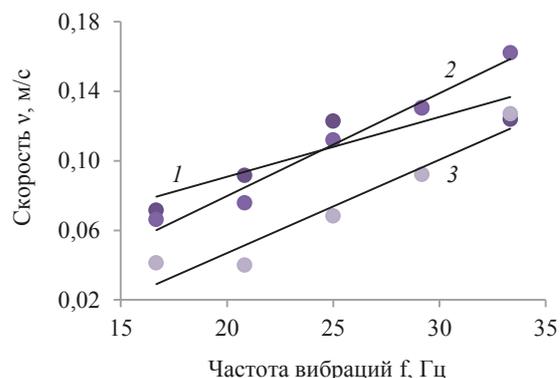
$$v_1 = 0,003 f - 0,045 \quad (h = 0,02 \text{ м}), \quad (7)$$

$$v_2 = 0,001 f - 0,004 \quad (h = 0,03 \text{ м}), \quad (8)$$

$$v_3 = 0,001 f - 0,001 \quad (h = 0,04 \text{ м}). \quad (9)$$

На рисунке 3 представлена группа линий, отражающих влияние угла β и частоты f вибрации на скорость (амплитуда вибрации $A = 0,0045$ м, высота ВКС = 0,02 м, перфорация отсутствует).

Из рисунка 3 видно, что с увеличением угла вибрации скорость вибротранспортирования уменьшается. Максимальное значение достигается при угле вибрации $\beta = 45^\circ$, так как при данном угле ви-



(1) $\beta = 30^\circ$ (2) $\beta = 45^\circ$ (3) $\beta = 60^\circ$

Рисунок 3 – Графическая зависимость скорости перемещения мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу от угла (β) и частоты вибрации (f)

Figure 3 – Characteristic curve of the effect of the angle (β) and frequency of vibration (f) on the path velocity of the flour baking mixture

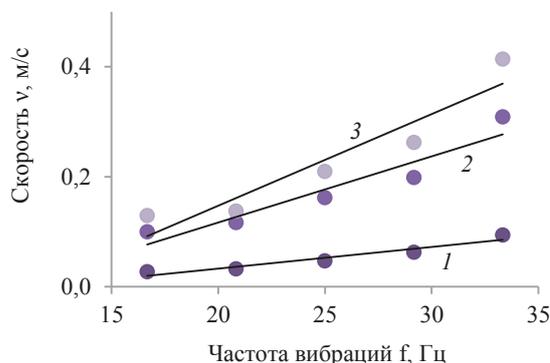
брации направленное возвратно-винтовое движение смеси осуществляется интенсивнее. Следовательно, для увеличения производительности вибрационного смесителя целесообразнее устанавливать именно данное значение угла вибрации. При угле вибрации $\beta = 30^\circ$ и $\beta = 60^\circ$ создаются менее благоприятные условия для перемещения мучной хлебопекарной смеси. Аппроксимирующие уравнения прямых имеют вид:

$$v_1 = 0,005 f - 0,022 \quad (\beta = 30^\circ), \quad (10)$$

$$v_2 = 0,005 f - 0,038 \quad (\beta = 45^\circ), \quad (11)$$

$$v_3 = 0,005 f - 0,06 \quad (\beta = 60^\circ). \quad (12)$$

На рисунке 4 представлена группа линий, отражающих влияние диаметра отверстий d рабочего органа и частоты f вибрации на скорость (угол ви-



(1) Без перфорации (2) $d = 0,005$ м (3) $d = 0,007$

Рисунок 4 – Графическая зависимость скорости перемещения мучной хлебопекарной смеси по рабочему органу от диаметра перфорации рабочего органа (d) и частоты вибрации (f)

Figure 4 – Characteristic curve of the effect of the diameter of the perforation (d) and the frequency of vibration (f) on the path velocity of the flour baking mixture

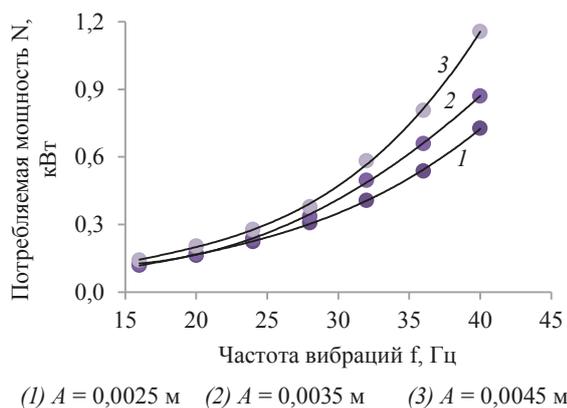


Рисунок 5 – Зависимость потребляемой мощности смесителя массой 16,5 кг от амплитуды и частоты вибрации

Figure 5 – Effect of the amplitude and frequency of vibration on the power consumption of the 16.5 kg mixer

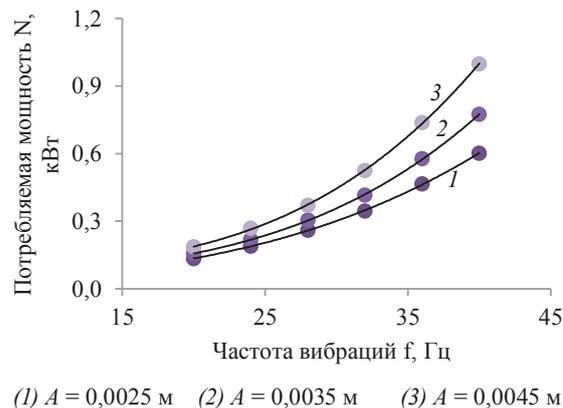


Рисунок 6 – Зависимость потребляемой мощности смесителя массой 25,5 кг от амплитуды и частоты вибрации

Figure 6 – Effect of the amplitude and frequency of vibration on the power consumption of the 25.5 kg mixer

брации $\beta = 45^\circ$, амплитуда вибрации $A = 0,0045$ м, высота ВКС 0,02 м).

Из рисунка 4 видно, что наибольшие значения скорости вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси наблюдается при диаметре перфорации $d = 0,007$ м, а наименьшие при ее отсутствии. Следовательно, чем больше диаметр перфорации рабочего органа d , тем выше скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси. Увеличение исследуемого параметра происходит за счет подсоса воздуха через слой. Для исследования влияния площади перфорации рабочего органа на скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси были приняты диаметры отверстий 0,005 и 0,007 м с целью исключения влияния изменения высоты слоя на скорость вибротранспортирования, т. к. при больших значениях площади перфорации ВКС мучной хлебопекарной смеси на рабочих витках уменьшался. При диаметре отверстий (например, $d = 0,002$ м) наблюдалось увеличение ВКС мучной хлебопекарной смеси на рабочем органе вибрационного смесителя, что ведет к уменьшению скорости вибротранспортирования. Аппроксимирующие уравнения прямых имеют вид:

$$v_1 = 0,005 f - 0,038 \text{ (без перфорации)}, \quad (13)$$

$$v_2 = 0,012 f - 0,123 \text{ (10 отв., } d = 0,005 \text{ м)}, \quad (14)$$

$$v_3 = 0,016 f - 0,185 \text{ (10 отв., } d = 0,007 \text{ м)}. \quad (15)$$

Далее отображены исследования по определению взаимного влияния технологических параметров смесителя на потребляемую мощность, имеющую важное значение при определении эффективности процессов смешивания. В ходе исследования в качестве ключевых были использованы параме-

тры: амплитуда ($A = 0,0025; 0,0035$ и $0,0045$ м), частота колебаний дебалансов ($f = 16,66; 21; 25; 29$ и $33,33$ Гц), дисперсность мучной хлебопекарной смеси, которая представлена в таблице 1.

На рисунке 5 представлены результаты исследования по определению взаимного влияния амплитуды (A) и частоты колебания (f) смесителя массой 16,5 кг на потребляемую мощность.

На рисунке 6 представлены результаты исследования по определению взаимного влияния амплитуды (A) и частоты колебания (f) смесителя массой 25,5 кг на потребляемую мощность.

Из рисунка 5 видно, что значения потребляемой мощности для смесителя массой 16,5 кг выше почти во всем диапазоне частот. Из рисунка 6 видно, что для смесителя массой 25,5 кг двигателю требуются большие энергозатраты для преодоления резонансной частоты. Минимальное рабочее значение частоты колебаний, при котором конструкция массой 25,5 кг работает устойчиво, составляет 20 Гц, в то время как более легкая конструкция может работать уже при 16 Гц. Выявлена закономерность для обеих конструкций смесителей заключающаяся в том, что чем выше амплитуда колебания, тем больше потребляемая мощность. Также в ходе исследований наблюдалось, что более тяжелая конструкция не подвержена чужеродным колебаниям, которые вызывали у более легкой конструкции нестабильность работы: отсутствие направленной вибрации, переход в резонансную частоту, что приводило к сегрегации ингредиентов на рабочем органе. Наименьшие показатели потребляемой мощности наблюдаются при $A = 0,0025$ м, а наибольшие, при $A = 0,0045$ м.

Для конструкции смесителя массой 16,5 кг аппроксимирующие уравнения кривых имеют вид:

$$N_{\text{ПОТР}} = 0,00002 \times f^3 - 0,001 \times f^2 + 0,0278 \times f - 0,1549 \text{ (} A = 0,0025 \text{ м)}, \quad (16)$$

$$N_{\text{ПОТР}} = 0,0000005 \times f^3 + 0,001 \times f^2 + 0,0274 \times f - 0,3027 \text{ (} A = 0,0035 \text{ м)}, \quad (17)$$

$$N_{\text{ПОТР}} = 0,00005 \times f^3 - 0,0022 \times f^2 + 0,0458 \times f - 0,2284 \text{ (} A = 0,0045 \text{ м)}. \quad (18)$$

Для конструкции смесителя массой 25,5 кг аппроксимирующие уравнения кривых имеют вид:

$$N_{\text{ПОТР}} = 0,000009 \times f^3 - 0,0001 \times f^2 + 0,0062 \times f - 0,0082 \quad (A = 0,0025 \text{ м}), \quad (19)$$

$$N_{\text{ПОТР}} = 0,00002 \times f^3 - 0,0006 \times f^2 + 0,0138 \times f - 0,0361 \quad (A = 0,0035 \text{ м}), \quad (20)$$

$$N_{\text{ПОТР}} = 0,00002 \times f^3 - 0,0005 \times f^2 + 0,0098 \times f - 0,0253 \quad (A = 0,0045 \text{ м}). \quad (21)$$

В результате исследования также выявлено, что большое влияние на потребляемую мощность оказывает влажность мучной хлебопекарной смеси и дисперсность её состава, который может изменяться в процессе воздействия на смесь. Поскольку самой мелкодисперсной является мука пшеничная хлебопекарная (16000–25000 м⁻¹), то рассмотрим влияние её дисперсности на потребляемую мощность: при начальной подаче муки пшеничной хлебопекарной наблюдается резкий скачок потребляемой мощности, который связан с увеличением её сцепления с поверхностью рабочего органа вибрационного смесителя. Затем под действием вибрации дисперсность муки пшеничной хлебопекарной повышается и она равномерно распределяется по длине рабочего органа вибрационного смесителя, тем самым наблюдается стабилизация потребляемой мощности. Также выявлено, что в различных режимах работы аппарата при увеличении его производительности потребляемая мощность уменьшается. Это свидетельствует об информативности потребляемой мощности как параметра, характеризующего качество готовой смеси и открывает возможность использования мощности для косвенного контроля её дисперсности в системах наблюдения за режимом работы вибрационного смесителя непрерывного действия.

Выводы

Анализ результатов исследования по определению влияния ключевых параметров на скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси v показал, что она возрастает с увеличением частоты колебаний рабочего органа f и амплитуды колебаний A , а некоторое снижение ее прироста в исследуемом диапазоне можно объяснить увеличивающимся эффектом проскальзывания муки по отношению к вибрирующей поверхности в режиме его отрывного движения по рабочему органу. Также в ходе исследований наблюдалось увеличение значений потребляемой мощности при возрастании амплитуды и частоты колебаний. Поскольку скорость вибротранспортирования мучной хлебопекарной смеси при амплитуде вибрации $A = 0,0045$ м не сильно отличается от той, которая составляет $A = 0,0035$ м, то целесообразнее ее применять для уменьшения потребляемой мощности вибрационного смесителя.

В результате исследований были определены ключевые рациональные параметры работы вибрационного смесителя при получении мучных хлебопекарных смесей: амплитуда вибрации $A = 0,0035$ м, угол вибрации $\beta = 45^\circ$, высота виброкипящего слоя 0,02 м, диаметр перфорации рабочего органа аппарата $d = 0,007$ м.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Ляшенко, В. С. Обзор и анализ смесителей сыпучих кормов / В. С. Ляшенко // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 56–60.
2. Особенности конструкций подъемных винтовых вибрационных смесителей непрерывного действия / А. Б. Шушпанников, Д. М. Бородулин, С. В. Злобин [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – Т. 29, № 2. – С. 102–106.
3. Современное смесительное оборудование для приготовления многокомпонентных энергонасыщенных композиций / М. В. Коробчук, А. Н. Веригин, В. Г. Джангирян [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 4. – С. 240–243.
4. Пушко, В. А. Перспективы применения смесительного оборудования вибрационного типа в условиях инновационного комбикормового производства / В. А. Пушко, И. Г. Бойко // Вестник ВНИИМЖ. – 2017. – Т. 25, № 1. – С. 78–82.
5. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers / V. N. Ivanets, D. M. Borodulin, A. B. Shushpannikov [et al.] // Foods and Raw Materials. – 2015. – Vol. 3, № 1. – P. 62–69. DOI: <https://doi.org/10.12737/11239>.
6. Денискина, Т. В. Теоретическое исследование движения материала на вибрирующей поверхности под действием направленных колебаний / Т. В. Денискина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 1. – С. 384–389.
7. Dubey, A. Powder flow and blending / A. Dubey // Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations / P. Pandey, R. Bharadwaj. – Elsevier, 2016. – P. 39–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01077-5>.
8. Comparative analysis of physical and chemical properties of biodegradable edible films of various compositions / L. Dyshlyuk, O. Babich, D. Belova [et al.] // Journal of Food Process Engineering. – 2017. – Vol. 40, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12331>.
9. Патент 2626415 Российская Федерация, В01F 11/00. Вибрационный смеситель / Шушпанников А. Б., Зорина Т. В., Шушпанников Е. А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет). – № 2016149970; опубл. 27.07.2017, Бюл. № 21.

10. Ballesteros Lopez, A. C. Flour mixture of rice flour, corn and cassava starch in the production of gluten-free white bread / A. C. Ballesteros Lopez, A. J. Guimarães Pereira, R. G. Junqueira // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. – 2004. – Vol. 47, № 1. – P. 63–70. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-89132004000100009>.
11. Udofia, P. G. Sensory evaluation of wheat-cassava-soybean composite flour (WCS) bread by the mixture experiment design / P. G. Udofia, P. J. Udoudo, N. O. Eyen // *African Journal of Food Science*. – 2013. – Vol. 7, № 10. – P. 368–374. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJFS09.108>.
12. Белокурова, Е. В. Пищевые сухие композитные смеси в производстве мучных кулинарных и хлебобулочных изделий функционального назначения / Е. В. Белокурова, А. А. Дерканосова // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 119–124.
13. Колмаков, Ю. В. Хлеб из композитных мучных смесей / Ю. В. Колмаков, Л. А. Зелова, И. В. Пахотина // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2015. – Т. 126, № 4. – С. 133–136.
14. ТР ТС 022/2011. Пищевая продукция в части ее маркировки. – 2011. – С. 29.
15. Рокосов, С. Ю. Определение скорости перемещения муки по лотку винтового вибрационного конвейера / С. Ю. Рокосов, С. В. Злобин, О. П. Рынза // *Инновационный конвент «Кузбасс: Образование, наука, инновации» / Кемеровский государственный университет*. – Кемерово, 2011. – С. 46–47.

References

1. Lyashenko VS. Review and analysis of mixers bulk feed. *Bulletin of Omsk State Agricultural University*. 2015;18(2):56–60. (In Russ.).
2. Shushpannikov AB, Borodulin DM, Zlobin SV, Rokosov SY. Features of designs of lifting screw vibration mixers of continuous action. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2013;29(2):102–106. (In Russ.).
3. Korobchuk MV, Verigin AN, Dzhangiryan VG, Fadeev DV, Abdullin IA. Sovremennoe smesitel'noe oborudovanie dlya prigotovleniya mnogokomponentnykh ehnergonasyschennykh kompozitsiy [Modern mixing equipment in the production of multicomponent energy-saturated compositions]. *Bulletin of the Technological University*. 2013;16(4):240–243. (In Russ.).
4. Pushko VA, Boyko IG. Prospects of innovative vibrating type mixing equipment's application for combined feed productivity. *Journal of VNIIMZH*. 2017;25(1):78–82. (In Russ.).
5. Ivanets VN, Borodulin DM, Shushpannikov AB, Sukhorukov DV. Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers. *Foods and Raw Materials*. 2015;3(1):62–69. DOI: <https://doi.org/10.12737/11239>.
6. Deniskina TV. A theoretical study of the movement of material on the vibrating surface under the influence of vibration direction. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2014;1(1):384–389. (In Russ.).
7. Dubey A. Powder flow and blending. In: Pandey P, Bharadwaj R, editors. *Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations*. Elsevier: 2016. pp. 39–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01077-5>.
8. Dyshlyuk L, Babich O, Belova D, Prosekov A. Comparative analysis of physical and chemical properties of biodegradable edible films of various compositions. *Journal of Food Process Engineering*. 2017;40(1). DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12331>.
9. Shushpannikov AB, Zorina TV, Shushpannikov EA, Shushpannikova AS. Vibratsionnyy smesitel' [Vibration mixer]. Russian patent RU 2626415. 2017.
10. Ballesteros Lopez AC, Guimarães Pereira AJ, Junqueira RG. Flour mixture of rice flour, corn and cassava starch in the production of gluten-free white bread. *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2004;47(1):63–70. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-89132004000100009>.
11. Udofia PG, Udoudo PJ, Eyen NO. Sensory evaluation of wheat-cassava-soybean composite flour (WCS) bread by the mixture experiment design. *African Journal of Food Science*. 2013;7(10):368–374. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJFS09.108>.
12. Belokurova EV, Derkanosova AA. Dietary composite dry mixture in the production of flour culinary and functionality products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2013;56(2):119–124. (In Russ.).
13. Kolmakov YuV, Zelova LA, Pakhotina IV. Bread baked of composite flour mixes. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2015;126(4):133–136. (In Russ.).
14. ТР ТС 022/2011. Pishchevaya produktsiya v chasti ee markirovki [Technical Regulations of Customs Union 022/2011. Labeling of food products]. 2011. 29 p.
15. Rokosov SYu, Zlobin SV, Rynza OP. Opredelenie skorosti peremeshcheniya muki po lotku vintovogo vibratsionnogo konveyera [Determination of the path velocity of flour along the tray of the screw vibration conveyor]. *Innovatsionnyy konvент "Kuzbass: Obrazovanie, nauka, innovatsii"* [Innovation Convention "Kuzbass: Education, Science, Innovations"]; 2011; Kemerovo. Kemerovo: Kemerovo State University; 2011. p. 46–47. (In Russ.).

Бородулин Дмитрий Михайлович

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологического проектирования пищевых производств, директор Института инженерных технологий, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-80, e-mail: borodulin_dmitri@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Зорина Татьяна Владимировна

аспирант кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (908) 941-82-58, e-mail: tanya.kaznacheeva.92@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0521-0950>

Иванец Виталий Николаевич

д-р техн. наук, профессор кафедры технологического проектирования пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6, тел.: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: tppp@kemsu.ru

Невская Екатерина Владимировна

канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГАНУ «Научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности», 107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, 26А, тел.: +7 (916) 701-94-92, e-mail: katerinarose@mail.ru

Тюрина Ольга Евгеньевна

канд. техн. наук, ученый секретарь, ФГАНУ «Научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности», 107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, 26А, тел.: +7 (915) 010-64-71, e-mail: oeturina@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7863-0772>

Борисова Алла Егоровна

канд. техн. наук, ученый секретарь, ФГАНУ «Научно-исследовательского института хлебопекарной промышленности», 107553, Россия, г. Москва, ул. Б. Черкизовская, 26А, тел.: + 7 (905) 530-15-35, e-mail: a.borisova@gosniihp.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7728-5129>

Dmitrij M. Borodulin

Dr.Sci.(Eng.), Professor, Head of the Department of Technological design of food productions, Director of the Institute of engineering technologies, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-80, e-mail: borodulin_dmitri@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-3035-0354>

Tatyana V. Zorina

Graduate Student of the Department of Technological design of food productions, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (908) 941-82-58, e-mail: tanya.kaznacheeva.92@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0521-0950>

Vitaliy N. Ivanets

Dr.Sci.(Eng.), Professor of the Department of Technological design of food productions, Kemerovo State University, 6, Krasnaya Str., Kemerovo, 650000, Russia, phone: +7 (3842) 39-68-37, e-mail: tppp@kemsu.ru

Ekaterina V. Nevskaya

Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia, phone: +7 (916) 701-94-92, e-mail: katerinarose@mail.ru

Olga E. Turina

Cand.Sci.(Eng.), Scientific Secretary, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia, phone: +7 (915) 010-64-71, e-mail: oeturina@yandex.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7863-0772>

Alla E. Borisova

Cand.Sci.(Eng.), Scientific Secretary, Scientific Research Institute for the Baking Industry, 26A, B. Cherkizovskaya Str., Moscow, 107553, Russia, phone: + 7 (905) 530-15-35, e-mail: a.borisova@gosniihp.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7728-5129>