

В.С. Тетерин ✉  
Н.С. Панфёров  
С.А. Пехнов  
Е.В. Пестряков  
А.Ю. Овчинников

Федеральный научный агроинженерный  
центр ВИМ, Москва, Россия

✉ v.s.teterin@mail.ru

Поступила в редакцию:  
10.08.2024

Одобрена после рецензирования:  
15.01.2024

Принята к публикации:  
30.01.2024

Vladimir S. Teterin ✉  
Nikolay S. Panferov  
Sergey A. Pehnov  
Efim V. Pestryakov  
Alexey Yu. Ovchinnikov

Federal Scientific Agroengineering Center  
VIM, Moscow, Russia

✉ v.s.teterin@mail.ru

Received by the editorial office:  
10.08.2024

Accepted in revised:  
15.01.2024

Accepted for publication:  
30.01.2024

# Теоретическое исследование рабочего органа тукосмесительной установки центробежного типа

## РЕЗЮМЕ

**Актуальность.** Использование удобрений в агропромышленном комплексе является важным средством для обеспечения устойчивого развития, продовольственной и экологической безопасности. Научное применение различных типов удобрений позволяет сократить негативное воздействие на природные экосистемы, а также оптимизировать использование ресурсов и учитывать индивидуальные потребности каждого растения. Благодаря сбалансированному составу и биологической модификации хелатными комплексами тукосмеси обладают повышенной биологической эффективностью и стимулируют рост растений. При этом существует актуальная задача получения смесей, которые имеют высокую степень однородности, в связи с чем требования к тукосмесительному оборудованию очень высоки, так как конструктивно-кинематические параметры являются наиболее важными факторами, влияющими на стабильность технологического процесса смешивания и равномерность конечной смеси.

**Методы.** На основе проведенного анализа существующих тукосмесительных установок авторами была предложена концепция тукосмесительной установки центробежного типа с рабочим органом в виде конусной поверхности. В ходе исследований были изучены процессы, происходящие во время работы рабочего органа предлагаемого центробежного смесителя с использованием методов математического анализа, графического и математического моделирования.

**Результаты.** В результате исследований установлено, что наибольшее влияние на изменение абсолютной скорости гранул оказывает окружная скорость гранул, которая в значительной степени определяется частотой вращения и параметрами конической поверхности. В свою очередь, установлено, что с течением времени угол между направлением абсолютной скорости гранул удобрений и образующей конической поверхности стремится к направлению окружной скорости, при этом с ростом частоты вращения данный показатель изменяется более быстро.

**Ключевые слова:** минеральные удобрения, точное земледелие, тукосмеси, тукосмесительная установка, система смешивания

**Для цитирования:** Тетерин В.С., Панфёров Н.С., Пехнов С.А., Пестряков Е.В., Овчинников А.Ю. Теоретическое исследование рабочего органа тукосмесительной установки центробежного типа. *Аграрная наука.* 2024; 379(2): 120–126.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-120-126>

©Тетерин В.С., Панфёров Н.С., Пехнов С.А., Пестряков Е.В., Овчинников А.Ю.

# Theoretical study of the working body of a centrifugal type mixing plant

## ABSTRACT

**Relevance.** The use of fertilizers in the agro-industrial complex is an important means to ensure sustainable development, food and environmental security. The scientific application of various types of fertilizers can reduce the negative impact on natural ecosystems, as well as optimize the use of resources and take into account the individual needs of each plant. Due to the balanced composition and biological modification by chelate complexes, fertilizer mixture has increased biological efficiency and stimulate plant growth. At the same time, there is an urgent task of obtaining mixtures that have a high degree of uniformity. In this connection, the requirements for the mixing equipment are very high, since the structural and kinematic parameters are the most important factors affecting the stability of the mixing process and the uniformity of the final mixture.

**Methods.** Based on the analysis of existing mixing plants, the authors proposed the concept of a centrifugal type mixing plant with a working body in the form of a conical surface. In the course of the research, the processes occurring during the operation of the working body, the proposed centrifugal mixer, were studied using methods of mathematical analysis, graphical and mathematical modelling.

**Results.** As a result of the research, it was found that the greatest influence on the change in the absolute velocity of the granules is exerted by the circumferential velocity of the granules, which is largely determined by the rotation frequency and parameters of the conical surface. In turn, it was found that over time, the angle between the direction of the absolute velocity of the fertilizer granules and the forming conical surface tends to the direction of the circumferential velocity, while with increasing rotation frequency, this indicator changes more rapidly.

**Key words:** mineral fertilizers, precision agriculture, fertilizer mixture, fertilizer mixture plant, mixing system

**For citation:** Teterin V.S., Panferov N.S., Pehnov S.A., Pestryakov E.V., Ovchinnikov A.Yu. Theoretical study of the working body of a centrifugal type mixing plant. *Agrarian science.* 2024; 379(2): 120–126 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-120-126>

©Teterin V.S., Panferov N.S., Pehnov S.A., Pestryakov E.V., Ovchinnikov A.Yu.

## Введение/Introduction

Использование удобрений в агропромышленном комплексе является важным средством для обеспечения устойчивого развития, продовольственной и экологической безопасности. Они помогают компенсировать потери питательных веществ с урожаем и предотвращать эрозию, инфильтрацию и денитрификацию, поддерживая биологический круговорот веществ. Научное применение различных типов удобрений позволяет сократить негативное воздействие на природные экосистемы, а также оптимизировать использование ресурсов и учитывать индивидуальные потребности каждого растения [1, 2].

Несмотря на рост ассортимента и качества минеральных удобрений, фермерам по-прежнему доступны только ограниченные составы сложных удобрений с фиксированной концентрацией макроэлементов (N/P/K), что не соответствует принципам точного земледелия.

Стоит обратить внимание, что эффективное соотношение элементов питания различается для разных полей и культур, и оно существенно отличается от стандартных удобрений, таких как нитрофоска, нитроаммофоска, азофоска, в связи с чем на практике могут возникать два противоположных сценария: если некоторые элементы питания в используемых удобрениях находятся в недостаточном количестве, это приводит к снижению урожайности и качества продукции, а также выносу питательных веществ из почвы; если элементы питания представлены в большем количестве, это приводит к нестабильности агробиоценозов из-за изменения почвенной среды, снижения буферных свойств и загрязнения грунтовых вод [2, 3].

Один из наиболее эффективных способов решения этой проблемы — использование тукосмесей, то есть смесей удобрений, созданных для конкретных условий применения. Благодаря сбалансированному составу и биологической модификации хелатными комплексами эти смеси обладают повышенной биологической эффективностью и стимулируют рост растений.

При этом существует актуальная задача получения смесей, которые имеют высокую степень однородности. Это необходимо для равномерного распределения важных и ценных компонентов, которые определяют эффективность готовой продукции.

Однако на практике идеальное распределение частиц в тукосмеси не достигается из-за воздействия множества факторов, таких как физические свойства компонентов, параметры конструкции и кинематики, а также технологические факторы.

В свою очередь, для получения качественной тукосмеси необходимо использовать оборудование, соответствующее технологическим требованиям. Основная часть технических средств, используемых для получения тукосмеси, представлена смесителями сыпучих материалов [4–8]. Поэтому требования к такому оборудованию очень высоки, так как конструктивно-кинематические параметры являются наиболее важными факторами, влияющими на стабильность технологического процесса смешивания.

В настоящее время в сельском хозяйстве барабанные, шнековые и комбинированные смесители, как непрерывного, так и периодического действия, являются наиболее популярными при протравливании семян в сухом и влажном состоянии, а также при смешивании сыпучих материалов, таких как твердые минеральные удобрения [2, 9].

Производством современных тукосмесительных установок занимаются различные отечественные и зарубежные компании, в частности ГК «Мегавес» (Россия), «Сипр Групп» (Россия), European machine trading (Нидерланды), Shunxin (Китай), Maschinenfabrik Gustav Eirich (Германия), Agro CS (Чехия), Doyle Equipment Manufacturing (США). При этом производимое ими оборудование отличается между собой по различным параметрам, включая их конструкцию, компоновку оборудования, принципы работы, способы дозирования и типы смесителей. Наиболее распространенными являются установки периодического действия, которые используют массовое дозирование компонентов.

При проведении научно-исследовательских работ особое внимание уделяется разработке эффективных методов, которые помогают снизить сегрегацию смесей в процессе их производства, транспортировки и применения. Особое внимание уделяется оптимизации гранулометрического состава смешиваемых компонентов, выбору режимов тукосмешивания и установке антисегрегирующих устройств в наиболее критических точках технологических схем, таких как ячеистые делители, формирователи потока и гибкие тукопроводы для равномерного распределения тукосмесей в транспортных средствах [9].

Зарубежные производители оборудования для тукосмешивания в настоящее время акцентируют внимание на стационарных ТСУ и больше фокусируются на изменении химического состава удобрений путем изменения их рецептуры при изготовлении гранул, а не на сухом смешивании с добавлением биопрепаратов. Практически за рубежом процесс тукосмешивания эволюционировал в разработку сложных удобрений с определенным количеством необходимых питательных веществ [10–12]. Стоимость оборудования для производства таких удобрений велика и приравнивается к стоимости мини-завода.

Суммируя вышесказанное, можно говорить о том, что при проектировании тукосмесительного оборудования необходимо обращать внимание на следующее: тукосмесительная установка должна иметь возможность осуществления полного цикла производства — начиная от загрузки и дозирования необходимых компонентов и заканчивая созданием готовой тукосмеси с установленной рецептурой и упаковкой готового продукта; при производстве в конструкции тукосмесительной установки необходимо использование композитных материалов, стойких к коррозионному и механическому износу; комбинирование нескольких методов смешивания на одной линии позволит добиться высокой степени однородности; возможность осуществления модификации тукосмесей путем добавления в них жидких и порошкообразных препаратов (биостимуляторов и модификаторов, средств защиты растений, антислеживателей и др.) позволит добиться повышения эффективности применения удобрений [13–18].

*Цель исследования* — теоретическое обоснование режимов смешивания конусного рабочего органа тукосмесительной установки центробежного типа.

## Материалы и методы исследования / Materials and methods

Выполнение работы осуществлялось в 2021 году на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. В ходе исследований были изучены процессы, происходящие во время выполнения операции смешивания, осуществляемой рабочим органом, выполненным в виде конуса, предлагаемого центробежного смесителя.

С этой целью применялись интегральные методы расчетов дифференциальных уравнений. Полученные результаты исчисления анализировались в программе MathCad (США). В ходе анализа оценивалось изменение скорости гранул минеральных удобрений и угла направления их абсолютной скорости при варьировании параметров начального положения гранул минеральных удобрений, коэффициента трения и частоты вращения конической поверхности.

### Результаты и обсуждение / Results and discussion

На основе проведенного анализа существующих тукосмесительных установок авторами была предложена концепция тукосмесительной установки центробежного типа с рабочим органом в виде конусной поверхности (рис. 1).

Представленная модель тукосмесительной установки (рис. 1) состоит из трех бункеров, направляющих лотков, формователя, вращающегося конуса, воронки, промежуточной камеры и выгрузного окна. Работает предлагаемая модель центробежного смесителя следующим образом: твердые минеральные удобрения из бункеров по направляющим лоткам через формователь поступают на вращающийся конус, на котором они распределяются по наружной поверхности в виде тонкого слоя, при этом каждый следующий вид удобрений поступает на предыдущий слой.

Таким образом при работе тукосмесительной установки в начальный момент времени гранулы минеральных удобрений из бункеров по трубопроводам поступают на вращающуюся коническую поверхность, попав на которую начинают движение по спиральной траектории. Проекцию движения гранул на плоскость, перпендикулярную оси вращения, можно записать как систему уравнений:

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos \varphi \\ y = r \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (1)$$

где:  $r$  — текущее расстояние от конической поверхности до оси вращения, м;  $\varphi$  — текущий угол поворота конической поверхности за время  $t$ , град.;

Движение гранул по образующей конусной поверхности будет описываться в декартовой системе координат  $\theta, \psi$  с началом в точке  $O_1$  (рис. 2). При попадании на вращающуюся конусную поверхность гранулы минеральных удобрений в начальный момент времени будут обладать исходными параметрами  $r, h, z$  и  $\theta$ , которые связаны между собой и геометрическими размерами конусной поверхности следующим выражением:

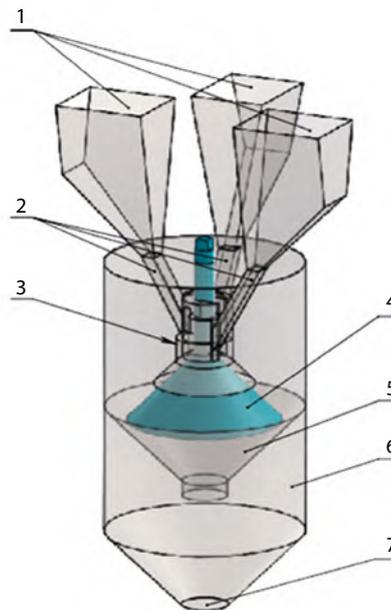
$$\begin{cases} r = r_0 \left( 1 - \frac{z}{h_0} \right) \\ z = h_0 \left( 1 - \frac{\theta}{L_0} \right) \end{cases} \quad (2)$$

где  $z, \theta$  — оси координат конусной поверхности,  $r_0$  — максимальный радиус конусной поверхности,  $h_0$  — высота конусной поверхности,  $L_0$  — длина образующей конусной поверхности.

На гранулы минеральных удобрений, находящихся на вращающейся конусной поверхности, будут действовать такие силы, как центробежная сила, сила реакции опоры, сила трения и вес гранул. Спроецировав данные

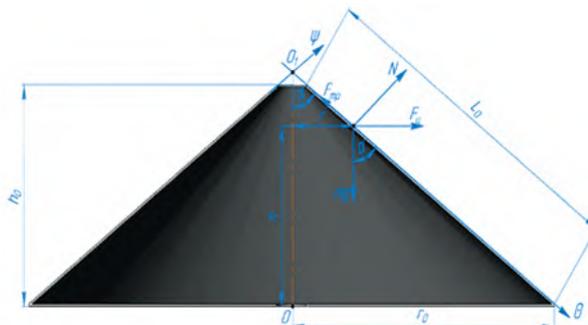
**Рис. 1.** Общий вид центробежного смесителя: 1 — бункер, 2 — лоток направляющий, 3 — формователь, 4 — конус вращающийся, 5 — воронка, 6 — промежуточная камера, 7 — окно выгрузное

**Fig. 1.** General view of the centrifugal mixer: 1 — hopper, 2 — guide tray, 3 — shaper, 4 — rotating cone, 5 — funnel, 6 — intermediate chamber, 7 — discharge window



**Рис. 2.** Расчетная схема для описания движения гранул минеральных удобрений

**Fig. 2.** Calculation scheme for describing the movement of mineral fertilizer granules



силы на плоскость  $\theta O_1 \psi$ , определим значение силы реакции опоры по следующему выражению:

$$N + m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \alpha - m \cdot g \cdot \sin \alpha = 0, \quad (3)$$

где:  $N$  — сила реакции опоры, Н;  $m$  — масса гранулы минеральных удобрений, кг;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  — угол наклона образующей конуса.

Таким образом, сила реакции опоры будет определяться по формуле:

$$N = m \cdot g \cdot \sin \alpha - m \cdot \omega^2 \cdot r \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

Угол  $\alpha$  будет определяться исходя из параметров конусной поверхности:

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{h_0}{L_0} \\ \sin \alpha = \frac{r_0}{L_0} \end{cases} \quad (5)$$

Движение гранул минеральных удобрений по конической поверхности, связанное с ее вращением в системе

координат  $\theta$   $\psi$  с учетом выражений (2), (4) и (5), будет определяться следующим уравнением:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = g \cdot \frac{h_0}{L_0} + \frac{\omega^2 \cdot r_0^2}{L_0^2} \cdot \theta - f \cdot \left( g \cdot \frac{r_0}{L_0} - \frac{\omega^2 \cdot r_0 \cdot h_0}{L_0^2} \cdot \theta \right), \quad (6)$$

Для упрощения расчетов вводим следующие обозначения:

$$A = \frac{\omega^2 \cdot r_0^2}{L_0^2} \left( 1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0} \right), \quad (7)$$

$$B = g \cdot \frac{h_0}{L_0} \left( 1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0} \right), \quad (8)$$

Подставив выражения (7) и (8) в выражение (6) и проинтегрировав, получим:

$$\theta(t) = \left( L_h + \frac{B}{A} \right) \cdot \text{ch}(\sqrt{A} \cdot t) - \frac{B}{A}, \quad (9)$$

С учетом выражений (2) и (8) можно найти изменение координаты высоты  $z$  при движении гранул минеральных удобрений по вращающейся конической поверхности:

$$z(t) = h_0 \left( 1 - \left( \frac{L_h}{L_0} + \frac{B}{L_0 \cdot A} \right) \cdot \text{ch}(\sqrt{A} \cdot t) - \frac{B}{L_0 \cdot A} \right), \quad (10)$$

Из выражения (10) определим время движения гранул по вращающейся конической поверхности, для этого зададимся следующими условиями:  $t = t_d$ ,  $z(t_d) = 0$ . Подставив данные условия в выражение (9) и преобразовав, получим:

$$t_d = \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \text{arcch} \left( \frac{L_0 + B/A}{L_h + B/A} \right), \quad (11)$$

Изменение скорости гранул минеральных удобрений в проекции на плоскость, перпендикулярную оси вращения на основе системы уравнений (1) и с учетом вышеизложенного, будет определяться:

$$\begin{cases} V_x = \frac{r_0}{L_0} \cdot \frac{\theta}{dt} \cdot \cos(\omega \cdot t) - \frac{r_0}{L_0} \cdot \omega \cdot \theta \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ V_y = \frac{r_0}{L_0} \cdot \frac{\theta}{dt} \cdot \sin(\omega \cdot t) + \frac{r_0}{L_0} \cdot \omega \cdot \theta \cdot \cos(\omega \cdot t) \end{cases}, \quad (12)$$

Изменение скоростей в полярной системе координат будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} V_r = \frac{r_0}{L_0} \cdot \frac{\theta}{dt} \\ V_\varphi = \frac{r_0}{L_0} \cdot \omega \cdot \theta \end{cases}, \quad (13)$$

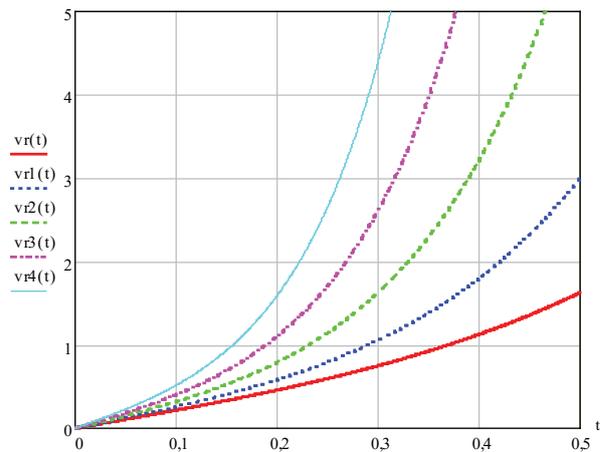
Подставив в систему уравнений (13) выражение (9) с учетом выражений (7) и (8), окончательно получим:

$$\begin{cases} V_r = \frac{r_0}{L_0} \cdot \omega \cdot \sqrt{1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0}} \cdot \left( L_h + \frac{g \cdot h_0 \cdot L_0 \cdot (1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0})}{\omega^2 \cdot r^2 \cdot (1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0})} \right) \cdot \text{sh} \left( \frac{r_0}{L_0} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0} \right) \cdot \omega \cdot t \right) \\ V_\varphi = \frac{r_0}{L_0} \cdot \omega \cdot \left( \left( L_h + \frac{g \cdot h_0 \cdot L_0 \cdot (1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0})}{\omega^2 \cdot r^2 \cdot (1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0})} \right) \cdot \text{ch} \left( \frac{r_0}{L_0} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0} \right) \cdot \omega \cdot t \right) - \frac{g \cdot h_0 \cdot L_0 \cdot (1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0})}{\omega^2 \cdot r^2 \cdot (1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0})} \right) \end{cases}, \quad (14)$$

На основе полученной системы уравнений (14) определим изменение компонентов скорости гранул

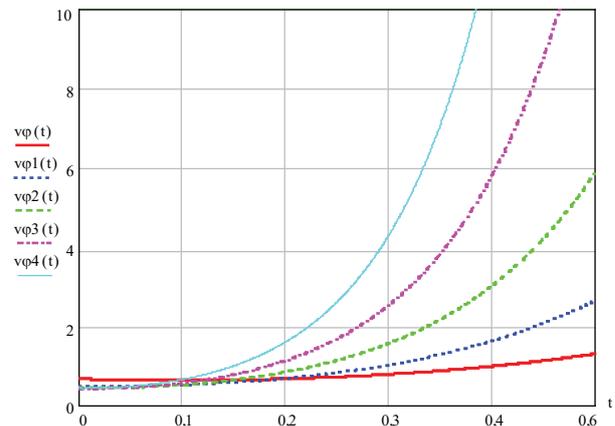
**Рис. 3.** Зависимость радиальной скорости движения гранул удобрений вдоль образующей конической поверхности от времени и частоты ее вращения

**Fig. 3.** Dependence of the radial velocity of fertilizer granules along the forming conical surface on the time and frequency of its rotation



**Рис. 4.** Зависимость окружной скорости движения гранул удобрений по конической поверхности от времени и частоты ее вращения

**Fig. 4.** Dependence of the circumferential velocity of fertilizer granules on a conical surface on the time and frequency of its rotation



минеральных удобрений, движущихся по вращающейся конической поверхности, исходя из основных параметров: начальное положение гранул минеральных удобрений ( $L_h$ ), геометрические параметры конической поверхности ( $r_0$  и  $h_0$ ) и частоты вращения ( $\omega$ ).

Анализ зависимостей производился в программе MathCad, где на основании выражения (13) были построены зависимости изменения радиальной и окружной скорости гранул минеральных удобрений (рис. 3, 4).

В качестве исходных параметров для построения зависимостей принимались следующие значения: радиус основания конической поверхности  $r_0 = 0,24$  м; высота конической поверхности  $h_0 = 0,168$  м; ускорение свободного падения  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup>; коэффициенты трения варьировались от 0,48 до 0,66, начальное положение гранул минеральных удобрений  $L_h$  — от 0,05 до 0,09 м, частота вращения — от 20 до 60 мин<sup>-1</sup>.

Анализ (рис. 3) показывает, что радиальная скорость движения гранул удобрений вдоль образующей конической поверхности в большей степени определяется частотой вращения и параметрами конической поверхности, а также временем нахождения гранулы на поверхности. В то же время изменение зоны попадания гранул удобрений на коническую поверхность в указанном диапазоне не оказывает существенного влияния на скорость.

Анализ графика показал, что наиболее значимым фактором увеличения окружной скорости являются частоты вращения и параметры конической поверхности. Изменение окружной скорости во времени нахождения на конической поверхности включает этап разгона гранулы на поверхности (движение с проскальзыванием), причем чем ниже скорость гранулы, тем меньше время этого периода.

На следующем этапе при более длительном времени нахождения на конической поверхности существенное влияние начинают оказывать частота вращения и параметры конической поверхности (текущий радиус вращения).

Для определения абсолютной скорости гранул на конической поверхности воспользовались тем, что радиальная и окружная скорости находятся перпендикулярно друг другу. Выражение для абсолютной скорости гранул запишется в следующем виде:

$$V(t) = \sqrt{V_r^2(t) + V_\phi^2(t)}, \quad (15)$$

На основании выражения (14) в программе MathCad построена зависимость изменения абсолютной скорости гранул минеральных удобрений (рис. 5).

Анализ полученной зависимости показал, что наибольшее влияние на изменение абсолютной скорости гранул оказывает окружная скорость гранул, которая в значительной степени определяется частотой вращения и параметрами конической поверхности.

Для определения направления скорости движения гранул по конической поверхности запишем выражение, характеризующее угол схода гранул удобрений относительно образующей конуса в определенный момент времени:

$$\beta = \arcsin \left( \frac{V_r(t)}{\sqrt{V_r^2(t) + V_\phi^2(t)}} \right), \quad (16)$$

где  $\beta$  — угол направления абсолютной скорости гранул удобрений относительно образующей конической поверхности.

В программе MathCad построены зависимости изменения угла направления абсолютной скорости гранул удобрений от образующей конической поверхности (рис. 6).

Анализ (рис. 6) показывает, что со временем угол направления абсолютной скорости гранул удобрений относительно образующей конической поверхности стремится к направлению окружной скорости, а с увеличением частоты вращения конической поверхности направление меняется быстрее.

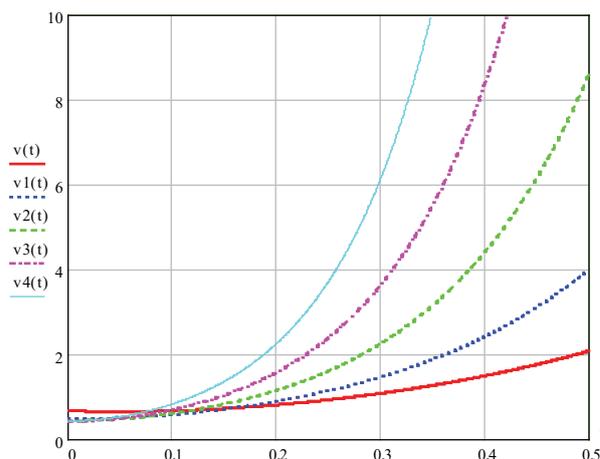
### Выводы/Conclusion

В ходе проведения теоретических исследований установлено, что с течением времени угол между направлением абсолютной скорости гранул удобрений и образующей конической поверхности стремится к направлению окружной скорости, при этом с ростом частоты вращения данный показатель изменяется динамичнее и доходит до максимальных значений в диапазоне времени (от 0,15 до 0,2 сек.).

В свою очередь, при изменении частоты вращения конической поверхности в диапазоне от 20 до

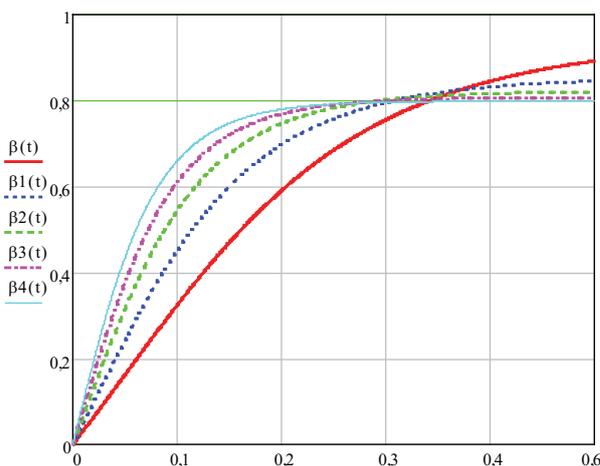
**Рис. 5.** Зависимость абсолютной скорости движения гранул удобрений по конической поверхности от времени и частоты ее вращения

**Fig. 5.** Dependence of the absolute speed of movement of fertilizer granules on a conical surface on the time and frequency of its rotation



**Рис. 6.** Зависимость изменения угла направления абсолютной скорости гранул удобрений относительно образующей конической поверхности от времени и частоты ее вращения

**Fig. 6.** Dependence of the change in the direction angle of the absolute velocity of fertilizer granules relative to the forming conical surface on the time and frequency of its rotation



60 мин<sup>-1</sup> происходит рост абсолютной скорости гранул минеральных удобрений, пропорциональный изменению их окружной скорости, максимальные значения которой достигаются при коэффициенте трения 0,66.

Учитывая вышеизложенное, необходимо отметить, что для предотвращения преждевременного ссыпания удобрений с конической поверхности необходимо соблюдать баланс скоростей. В связи с тем, что значение коэффициента трения для различных типов гранулированных минеральных удобрений о стальную поверхность варьируется от 0,31 до 0,66, можно сделать вывод, что для смешивания минеральных удобрений с различными коэффициентами трения рациональные режимы работы будут при частоте вращения конической поверхности от 40 мин<sup>-1</sup>, при этом осуществляя смешивание удобрений с коэффициентом трения, приближающимся к минимальному значению, частоту вращения конической поверхности следует увеличивать.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные.  
Все авторы внесли равный вклад в работу.  
Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.  
Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors made an equal contribution to the work.  
The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.  
The authors declare no conflict of interest.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования. *Агрехимия*. 2020; (6): 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
2. Митрофанов С.В., Орлова Н.В., Благов Д.А., Панферов Н.С., Тетерин В.С. Анализ тенденций развития тукосмесительного оборудования. *Аграрная наука*. 2023; (6): 98–110. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-98-110>
3. Дорохов А.С., Новиков Н.Н., Митрофанов С.В. Интеллектуальная технология формирования системы удобрения. *Техника и оборудование для села*. 2020; (7): 2–5. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-2-5>
4. Рычков В.А., Катаев А.А., Смагин А.В. Приготовление тукосмесей в условиях хозяйств. *Техника в сельском хозяйстве*. 2010; (1): 37–38. <https://www.elibrary.ru/nordur>
5. Личман Г.И., Марченко Н.М., Елизаров В.П., Марченко А.Н. Обоснование параметров машинной технологии приготовления органо-бактериальных удобрений. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016; (1): 43–48. <https://elibrary.ru/vkzgyx>
6. Longlong R., Zhang H., Zhang S., Fan G., Li Y., Song Y. Experimental research on efficient irrigation system with mixed fertilizer in integration of water and fertilizer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1550(4): 042004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/4/042004>
7. Nogalska A., Czaplaj J., Skwierawska M. The effect of multi-component fertilizers on spring triticale yield, the content and uptake of macronutrients. *Journal of Elementology*. 2012; 17(1): 95–104.
8. Белоусов И.Е., Кремзин Н.М. Эффективность применения полиэлементных тукосмесей в рисоводстве. *Достижения науки и техники АПК*. 2016; 30(8): 40–41. <https://www.elibrary.ru/wjztnl>
9. Гайбарян М.А., Сидоркин В.И., Гапеева Н.Н. Оптимизация структурного построения технологического процесса тукосмешения и биомодификации твердых минеральных удобрений. *Техника и оборудование для села*. 2021; (10): 17–22. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-10-17-22>
10. Францкевич В.С., Высоцкая Н.А., Дворник А.П. Гранулирование сложносмесанных удобрений в барабанном грануляторе-сушилке. *Механика. Исследования и инновации*. 2021; (14): 226–233. <https://www.elibrary.ru/mnwokm>
11. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Жаворонков Н.М. Системный анализ процессов химической технологии: основы стратегии. Монография. 2-е изд. М.: Юрайт. 2018; 499. ISBN 978-5-534-06991-4 <https://www.elibrary.ru/zcyhsc>
12. Туркин В.Н., Комягин А.С. Оптимизация применения минеральных и биологизированных удобрений с использованием тукосмесительных машин нового поколения. Принципы и технологии экологизации производства в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. Материалы 68-й Международной научно-практической конференции, посвященной Году экологии в России. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева. 2017; 2: 350–354. <https://elibrary.ru/zgdrwl>
13. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Пехнов С.А., Сухоруков Д.Г. Разработка лабораторного стенда для исследования рабочих органов распределителей удобрений центробежного типа. *Техника и оборудование для села*. 2020; (7): 26–29. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-26-29>
14. Панферов Н.С., Тетерин В.С., Митрофанов С.В., Благов Д.А., Пехнов С.А., Сухоруков Д.Г. Тенденции развития машин с центробежными рабочими органами для поверхностного внесения твердых минеральных удобрений. *Техника и оборудование для села*. 2021; (12): 18–24. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-18-24>
15. Павлов В.С., Смирнов А.Г., Гордеев А.А. Коррозионная стойкость конструкционных материалов в контакте с комплексными удобрениями. *Научно-образовательные и прикладные аспекты производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Сборник материалов V Международной научно-практической конференции*. Чебоксары: Чувашский государственный аграрный университет. 2021; 619–624. <https://www.elibrary.ru/uaoufl>
16. Mitrofanov S.V., Novikov N.N. Efficiency of using stimulating preparations in pre-treatment of spring barley seeds. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2020; 26(5): 958–965.
17. Новиков Н.Н., Рычков В.А., Тихонова О.В., Ариткин А.Г. О приготовлении модифицированных минеральных удобрений в условиях сельскохозяйственных предприятий. *Проблемы механизации агротехнического обеспечения сельского хозяйства*. 2016; (10): 185–192. <https://www.elibrary.ru/zfclz>
18. Кonyaев Е.Р., Костин Я.В., Акулина И.А. Научные основы получения и применения биомодифицированных минеральных удобрений. *Теоретический и практический потенциал в АПК, лесном хозяйстве и сфере гостеприимства. Материалы Национальной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых*. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева. 2021; 69–72. <https://www.elibrary.ru/myuuc>

## REFERENCES

1. Sychev V.G., Shafran S.A., Vinogradova S.B. Soil fertility in Russia and ways of its regulation. *Agricultural Chemistry*. 2020; (6): 3–13 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120060125>
2. Mitrofanov S.V., Orlova N.V., Blagov D.A., Panferov N.S., Teterin V.S. Analysis of trends in the development of fertilizer mixing equipment. *Agrarian science*. 2023; (6): 98–110 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-98-110>
3. Dorokhov A.S., Novikov N.N., Mitrofanov S.V. Intelligent fertilizer system technology. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020; (7): 2–5 (in Russian). <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-2-5>
4. Rychkov V.A., Katayev A.A., Smagin A.V. Preparation of fertilizer mixtures in the conditions of economies. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 2010; (1): 37–38 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/nordur>
5. Lichman G.I., Marchenko N.M., Elizarov V.P., Marchenko A.N. Justification of parameters of machine technology of organo-bacterial fertilizers preparation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016; (1): 43–48 (in Russian). <https://elibrary.ru/vkzgyx>
6. Longlong R., Zhang H., Zhang S., Fan G., Li Y., Song Y. Experimental research on efficient irrigation system with mixed fertilizer in integration of water and fertilizer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1550(4): 042004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1550/4/042004>
7. Nogalska A., Czaplaj J., Skwierawska M. The effect of multi-component fertilizers on spring triticale yield, the content and uptake of macronutrients. *Journal of Elementology*. 2012; 17(1): 95–104.
8. Belousov I.E., Kremzin N.M. Efficiency of polyelement fertilizer mixtures in rice growing. *Achievements of science and technology in agribusiness*. 2016; 30(8): 40–41 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/wjztnl>
9. Gaibaryan M.A., Sidorkin V.I., Gapeeva N.N. Optimization of the structural design of the process of fertilizer mixing and biomodification of solid mineral fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021; (10): 17–22 (in Russian). <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-10-17-22>
10. Frantskevich V.S., Vysotskaya N.A., Dvornik A.P. Granulation of complex-mixed fertilizers in a drum granulator-dryer. *Mechanics. Researches and Innovations*. 2021; (14): 226–233 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/mnwokm>
11. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Zhavoronkov N.M. System analysis of chemical technology processes: Processes of grinding and mixing of bulk materials: basics of strategy. Monograph. 2nd Ed. Moscow: Yurayt. 2018; 499 (in Russian). ISBN 978-5-534-06991-4 <https://www.elibrary.ru/zcyhsc>
12. Turkin V.N., Komyagin A.S. Optimization of the use of mineral and biologized fertilizers using a new generation of tukosmesitelnye machines. *Principles and technologies of greening production in agriculture, forestry and fisheries. Proceedings of the 68th International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Ecology in Russia*. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2017; 2: 350–354 (in Russian). <https://elibrary.ru/zgdrwl>
13. Panferov N.S., Teterin V.S., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Development of a laboratory bench for the study of the working bodies of centrifugal fertilizer spreaders. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2020; (7): 26–29 (in Russian). <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2020-7-26-29>
14. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., Blagov D.A., Pekhnov S.A., Sukhorukov D.G. Trends in the development of machines fitted with centrifugal working bodies for surface application of solid mineral fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021; (12): 18–24 (in Russian). <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-12-18-24>
15. Pavlov V.S., Smirnov A.G., Gordeev A.A. Corrosion resistance of construction materials in contact with complex fertilizers. *Scientific, educational and applied aspects of the production and processing of agricultural products. Collection of materials of the V International Scientific and Practical Conference*. Cheboksary: Chuvash State Agrarian University. 2021; 619–624 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/uaoufl>
16. Mitrofanov S.V., Novikov N.N. Efficiency of using stimulating preparations in pre-treatment of spring barley seeds. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2020; 26(5): 958–965.
17. Novikov N.N., Rychkov V.A., Tikhonova O.V., Aritkin A.G. On the preparation of modified mineral fertilizers in conditions of agricultural enterprises. *Problemy mekhanizatsii agrokhimicheskogo obespecheniya sel'skogo khozyaystva*. 2016; (10): 185–192 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/zfclz>
18. Konyaev E.R., Kostin Ya.V., Akulina I.A. Scientific bases of obtaining and applying biomodified mineral fertilizers. *Theoretical and practical potential in agriculture, forestry and hospitality. Proceedings of the National Scientific and Practical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists*. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2021; 69–72 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/myuuc>

## ОБ АВТОРАХ

**Владимир Сергеевич Тетерин**

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник  
v.s.teterin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>

**Николай Сергеевич Панферов**

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник  
nikolaj-panfyorov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7431-7834>

**Сергей Александрович Пехнов**

старший научный сотрудник  
pehnov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9471-6074>

**Ефим Вадимович Пестряков**

научный сотрудник  
unlimited-007@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>

**Алексей Юрьевич Овчинников**

младший научный сотрудник  
aleksovchinn@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-2188-1527>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,  
1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Россия

## ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir Sergeevich Teterin**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
v.s.teterin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>

**Nikolay Sergeevich Panferov**

Candidate of Technical Sciences  
Senior Researcher  
nikolaj-panfyorov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7431-7834>

**Pekhanov Sergey Alexandrovich**

Senior Researcher  
pehnov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9471-6074>

**Efim Vadimovich Pestryakov**

Researcher  
unlimited-007@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-7399-9906>

**Alexey Yurievich Ovchinnikov**

Junior Researcher  
aleksovchinn@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-2188-1527>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,  
5 1<sup>st</sup> Institute Passage, Moscow, 109428, Russia