

УДК 631.171:62-503.57  
Научная статья  
DOI: 10.32634/0869-8155-2024-383-6-118-125

В.С. Тетерин<sup>1</sup> ✉  
Н.С. Панфёров<sup>1</sup>  
С.А. Пехнов<sup>1</sup>  
С.В. Митрофанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный научный  
агроинженерный центр ВИМ, Москва,  
Россия  
<sup>2</sup> Высшая школа экономики, Москва,  
Россия

✉ v.s.teterin@mail.ru

Поступила в редакцию:  
15.02.2024  
Одобрена после рецензирования:  
14.06.2024  
Принята к публикации:  
29.05.2024

Research article  
DOI: 10.32634/0869-8155-2024-383-6-118-125

Vladimir S. Teterin<sup>1</sup> ✉  
Nikolay S. Panferov<sup>1</sup>  
Sergey A. Pehnov<sup>1</sup>  
Sergey V. Mitrofanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Federal Scientific Agroengineering  
Center VIM, Moscow, Russia  
<sup>2</sup> Higher School of Economics, Moscow,  
Russia

✉ v.s.teterin@mail.ru

Received by the editorial office:  
15.02.2024  
Accepted in revised:  
14.05.2024  
Accepted for publication:  
29.05.2024

Теоретические исследования движения гранул  
минеральных удобрений в камере смешивания  
тукосмесительной установки центробежного  
действия

РЕЗЮМЕ

**Актуальность.** Использование минеральных удобрений способствует улучшению плодородия почв, стимулирует рост и развитие растений, что достигается за счет наличия необходимых питательных элементов. В свою очередь, важно соблюдать правильность внесения удобрений, что позволяет контролировать уровень питательных веществ в почве, предотвращая как их избыток, так и недостаток. В настоящее время основное внесение удобрений приходится на комплексные минеральные удобрения, при этом одним из недостатков является то, что в их составе могут содержаться элементы питания, которые будут не востребованы растением, что может привести к нарушению экологического баланса. Один из вариантов решения данной проблемы — применение тукосмесей. При использовании тукосмесей определяющим фактором является однородность смешивания, которая во многом определяется используемым оборудованием, в связи с чем актуальной задачей является разработка тукосмесительного оборудования, отвечающего необходимым показателям.

**Методы.** В ходе исследований были изучены процессы, происходящие в камере смешивания разработанной тукосмесительной установки с использованием методов математического анализа, графического и математического моделирования.

**Результаты.** В результате исследований установлено, что при работе тукосмесительной установки качество смешивания определяется частотой вращения конического ротора. При этом гранулы минеральных удобрений после схода с конического ротора, ссыпаясь в собирающую воронку, продолжают свое движение по спиральной траектории. В процессе движения гранул по поверхности вращающегося конуса, а также при движении по воронке их траектории будут пересекаться между собой, что будет приводить к их активному смешиванию.

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

**Для цитирования:** Тетерин В.С., Панфёров Н.С., Пехнов С.А., Митрофанов С.В. Теоретические исследования движения гранул минеральных удобрений в камере смешивания тукосмесительной установки центробежного действия. *Аграрная наука*. 2024; 383(6): 118–125.  
<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-118-125>

©Тетерин В.С., Панфёров Н.С., Пехнов С.А., Митрофанов С.В.

Theoretical studies of the movement of mineral  
fertilizer granules in the mixing chamber  
of a centrifugal mixing plant

ABSTRACT

**Relevance.** The use of mineral fertilizers helps to improve soil fertility, stimulates the growth and development of plants, which is achieved due to the availability of necessary nutrients. In turn, it is important to observe the correct application of fertilizers, which allows you to control the level of nutrients in the soil, preventing both their excess and deficiency. Currently, the main application of fertilizers falls on complex mineral fertilizers, while one of their disadvantages is that they may contain nutrients that will not be in demand by the plant, which can lead to a violation of the ecological balance. One of the solutions to this problem is the use of flour mixtures. When using mixtures, the determining factor is the uniformity of mixing, which is largely determined by the equipment used. In this regard, the urgent task is to develop a mixing equipment that meets the necessary indicators.

**Methods.** During the research, the processes occurring in the mixing chamber of the developed mixing plant were studied using methods of mathematical analysis, graphical and mathematical modeling.

**Results.** As a result of the research, it was found that during the operation of the mixing plant, the mixing quality is determined by the rotation frequency of the conical rotor. At the same time, the granules of mineral fertilizers after leaving the conical rotor, pouring into the collecting funnel, continue their movement along a spiral trajectory. During the movement of the granules along the surface of the rotating cone, as well as when moving through the funnel, their trajectories will intersect with each other, which will lead to their active mixing.

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

**For citation:** Teterin V.S., Panferov N.S., Pehnov S.A., Mitrofanov S.V. Theoretical studies of the movement of mineral fertilizer granules in the mixing chamber of a centrifugal mixing plant. *Agrarian science*. 2024; 383(6): 118–125 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-383-6-118-125>

© Teterin V.S., Panferov N.S., Pehnov S.A., Mitrofanov S.V.

## Введение/Introduction

Внесение минеральных удобрений при возделывании сельскохозяйственных культур является неотъемлемой частью производства. Их использование способствует улучшению плодородия почв, стимулирует рост и развитие растений, что достигается за счет наличия необходимых питательных элементов. В свою очередь, при внесении минеральных удобрений необходимо строго соблюдать нормы. Правильное внесение удобрений позволяет контролировать уровень питательных веществ в почве, предотвращая как их избыток, так и недостаток. В свою очередь, их безответственное внесение способно привести к таким негативным последствиям, как загрязнение почвы и водных ресурсов, а также неблагоприятное воздействие на здоровье человека [1–3].

Основная доля при внесении удобрений в настоящее время приходится на комплексные минеральные удобрения, что в первую очередь обусловлено снижением затрат на внесение, благодаря их многокомпонентному составу. Их внесение способствует увеличению урожайности, однако при работе с ними важно учитывать потребность растений в том или ином элементе питания, а также наличие соответствующих элементов в почве. В противном случае некоторые из них могут оказаться невостребованными растениями, что в конечном итоге может привести к нарушению экологического баланса [4–6].

В свою очередь, использование многокомпонентных удобрений (тукосмесей), рецептура которых учитывает потребности конкретной культуры, а также почвенно-климатических условий, при которых она будет возделываться, будет являться гораздо более эффективным в сравнении с комплексными удобрениями. Стоит обратить внимание, что при изготовлении туко-смесей могут использоваться биологически активные комплексы, обеспечивающие доступность элементов питания для растений, тем самым повышая биологическую эффективность удобрений, что в конечном итоге позволяет добиться сокращения норм вносимых удобрений [7–9].

В настоящее время можно выделить три основных подхода при производстве туко-смесей. Первый — изготовление смесей на установках малой производительности (от 1000 до 4000 т/год). В данном случае реализация туко-смесей производится в радиусе до 50 км, а их внесение осуществляется сразу же после получения их потребителем. Гибкость технологии позволяет по заказу потребителя готовить смеси с любым соотношением питательных веществ, а также рецептурные смеси, исходя из обеспеченности почв и потребности растений в питательных веществах [10, 11]. Второй подход ориентирован на большие объемы производства в сравнении с первым, и туко-смесительные заводы имеют привязку к местам выгрузки смешиваемых удобрений. Производительность заводов при данном подходе доходит до 50 тыс. т/год. Реализация готовых туко-смесей возможна как насыпью, так и в затаренном виде, позволяя заготавливать удобрения заблаговременно [10, 12]. Третий подход базируется на установках промышленного типа мощностью от 30 до 300 тыс. т/год.

Производство туко-смесей различных марок достигается за счет использования для смешивания нескольких базовых марок сложных удобрений, и реализация потребителю, как правило, производится в затаренном виде [10–13].

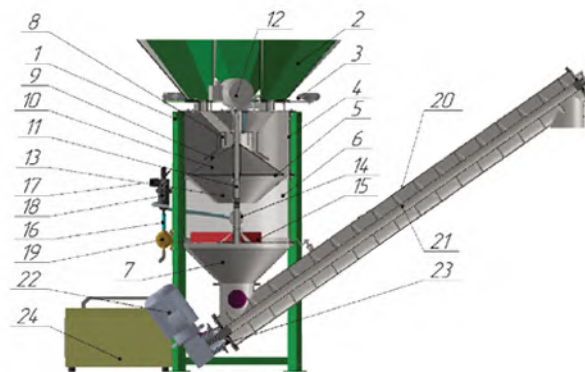
В последние годы в России отмечается растущий интерес к туко-смесям. Однако их широкое распространение затруднено рядом сложностей, которые вынуждают аграриев обращаться к более традиционным формам удобрений. Многие российские хозяйства еще не готовы к использованию туко-смесей. Следует понимать, что, прежде чем применять какие-либо удобрения (простые, сложные) или туко-смеси, агроному хозяйства нужно определить потребность в удобрениях, учесть выращиваемую культуру, показатели агрохимии почвы, сорта и т. д.

Важно отметить тот факт, что при использовании туко-смесей определяющим фактором является однородность смешивания. Данный показатель во многом зависит от используемого оборудования. Кроме того, необходимо учитывать и такие показатели, как производительность установки, возможность дополнительной обработки туко-смесей биологически активными препаратами, точность дозирования и др. [13–15]. В связи с этим учеными центра была разработана туко-смесительная установка центробежного действия с возможностью обработки биопрепаратами получаемых туко-смесей (рис. 1).

Разработанная конструкция туко-смесительной установки центробежного типа включает в себя несущую раму с установленными в верхней части бункерами для минеральных удобрений, которые оборудованы системой весового контроля и дозирования. В средней части рамы смонтирован цилиндрический корпус, состоящий из камеры смешивания, камеры обработки биопрепаратами и выгрузной камеры. В свою очередь, камера смешивания состоит из загрузочных патрубков, идущих от бункеров для минеральных удобрений, делительной камеры, оборудованной над коническим ротором, установленным на валу мотор-редуктора, нижняя часть

**Рис. 1.** Общий вид конструкции разработанной туко-смесительной установки: 1 — несущая рама, 2 — бункера, 3 — система весового контроля и дозирования, 4 — цилиндрический корпус, 5 — камера смешивания, 6 — камера обработки биопрепаратами, 7 — выгрузная камера, 8 — загрузочные патрубки, 9 — делительная камера, 10 — конический ротор, 11 — вал, 12 и 22 — мотор-редуктор, 13 — собирающая воронка, 14 — туманообразующие форсунки, 15 — лопастной смеситель, 16 — система трубопроводов, 17 — регулятор давления, 18 — фильтр, 19 — насос, 20 — шнековый транспортер, 21 — шнек, 23 — гофрированный трубопровод, 24 — тепловая пушка

**Fig. 1.** General view of the design of the developed mixing plant: 1 — bearing frame, 2 — hoppers, 3 — weight control and dosing system, 4 — cylindrical body, 5 — mixing chamber, 6 — biologics treatment chamber, 7 — unloading chamber, 8 — loading nozzles, 9 — dividing chamber, 10 — conical rotor, 11 — shaft, 12 and 22 — gear motor, 13 — collecting funnel, 14 — misting nozzles, 15 — paddle mixer, 16 — pipeline system, 17 — pressure regulator, 18 — filter, 19 — pump, 20 — screw conveyor, 21 — screw, 23 — corrugated pipeline, 24 — the heat gun



<sup>1</sup> Пехнов С.А. и др. Патент RU 2773547 С1. Туко-смесительная установка с обработкой биопрепаратами. Опубликовано 06.06.2022.

камеры смешивания выполнена в виде собирающей воронки. В нижней части цилиндрического корпуса расположена камера обработки биопрепаратами, в которой установлены туманообразующие форсунки и лопастной смеситель, предназначенный для ссыпания обработанной тукосмеси в выгрузную камеру. Туманообразующие форсунки соединены через систему трубопроводов с регулятором давления и фильтром с насосом. Нижняя часть выгрузной камеры оборудована шнековым транспортером со шнеком и мотор-редуктором. К нижней части выгрузной камеры через гофрированный трубопровод подсоединена тепловая пушка<sup>1</sup>.

*Цель исследования* — анализ движения гранул минеральных удобрений в смесительной камере тукосмесительной установки

#### Материалы и методы исследования / Materials and methods

С целью изучения процессов, протекающих в камере смешивания тукосмесительной установки центробежного типа в процессе ее работы, в 2021 году на базе ФНАЦ ВИМ были проведены теоретические исследования, в ходе которых использовались интегральные методы расчетов дифференциальных уравнений и процессы компьютерного моделирования. Для получения аналитических зависимостей использовались программы MathCad (PTC, США), 3DSMax (Yost Group, США) и Statistica (Dell, США).

В процессе анализа полученных данных оценивались изменения показателей скорости гранул минеральных удобрений и траектории их движения в зависимости от различных начальных условий, коэффициента трения и скорости вращения конуса.

#### Результаты и обсуждение / Results and discussion

Рабочий процесс рассматриваемой тукосмесительной установки происходит следующим образом. В программном обеспечении, установленном на портативном компьютере, выбирается необходимое соотношение компонентов тукосмеси, после этого осуществляется запуск программы, в результате чего происходит выполнение операций согласно заданным алгоритмам. Из бункеров для минеральных удобрений компоненты тукосмеси через загрузочные патрубки и делительную камеру поступают в камеру смешивания, где происходят основные процессы смешивания. После смесительной камеры гранулы ссыпаются в камеру обработки биопрепаратами, где при помощи туманообразующих форсунок происходит их обработка раствором биопрепаратов согласно техническому заданию. Далее гранулы поступают в выгрузную камеру, где происходят их подсушивание горячим воздухом, создаваемым

тепловой пушкой, и последующая выгрузка в необходимую тару при помощи шнекового транспортера.

Одним из ключевых моментов, влияющих на качество получаемой тукосмеси в процессе работы установки, является процесс смешивания гранул минеральных удобрений, происходящий в камере смешивания. Условно данный процесс можно разделить на два основных этапа — движение гранул по коническому ротору и ссыпание гранул в собирающей воронке. При этом важно учитывать тот факт, что камера смешивания состоит из двух основных элементов — вращающегося конического ротора и собирающего конуса (воронки). В свою очередь, движение гранул минеральных удобрений по коническим поверхностям в декартовой системе координат будет определяться исходными параметрами и геометрическими размерами конической поверхности.

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

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

На первом этапе гранулы минеральных удобрений из бункеров через загрузочные патрубки и делительную камеру поступают на конический ротор, где тонким ровным слоем распределяются по поверхности, при этом каждый следующий компонент подается на предыдущий. В результате на данном этапе гранулы минеральных удобрений подвергаются предварительному перемешиванию и приобретают начальную скорость смешивания, которая будет определяться как абсолютная скорость двух составляющих скоростей (окружной и радиальной), векторы которых расположены перпендикулярно относительно друг друга, и описываться следующим выражением:

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

где:  $V_r(t)$  — радиальная скорость движения гранул минеральных удобрений, м/с;  $V_\phi(t)$  — окружная скорость движения гранул минеральных удобрений, м/с.

На основе ранее проведенных исследований была получена система уравнений, характеризующая значения радиальной и окружной скоростей [16].

$$\begin{cases} V_r = \frac{r_0^2}{L_0^2} \cdot \omega \cdot \sqrt{1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0}} \cdot \left( L_h + \frac{g \cdot h_0 \cdot L_0 \cdot (1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0})}{\omega^2 \cdot r^2 \cdot (1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0})} \right) \cdot \operatorname{sh} \left( \frac{r_0}{L_0} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0} \right) \cdot \omega \cdot t \right) \\ V_\phi = \frac{r_0}{L_0} \cdot \omega \cdot \left( \left( L_h + \frac{g \cdot h_0 \cdot L_0 \cdot (1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0})}{\omega^2 \cdot r^2 \cdot (1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0})} \right) \cdot \operatorname{ch} \left( \frac{r_0}{L_0} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0} \right) \cdot \omega \cdot t \right) - \frac{g \cdot h_0 \cdot L_0 \cdot (1 - f \cdot \frac{r_0}{h_0})}{\omega^2 \cdot r^2 \cdot (1 + f \cdot \frac{h_0}{r_0})} \right) \end{cases}, \quad (3)$$

где:  $r_0$  — максимальный радиус конусной поверхности, м;  $h_0$  — высота конусной поверхности, м;  $L_0$  — длина образующей конусной поверхности, м;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L_h$  — начальное положение гранул минеральных удобрений, м;  $\omega$  — угловая скорость вращения конического ротора, мин<sup>-1</sup>;  $r$  — текущее расстояние от конической поверхности до оси вращения, м;  $t$  — время вращения, с;  $f$  — коэффициент трения скольжения.

Используя полученные выражения (2) и (3), в программе MathCad была построена графическая зависимость изменения начальной скорости смешивания от времени нахождения гранул на коническом роторе (рис. 2). 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 в диапазоне от 0,48 до 0,66, начальное положение гранул минеральных удобрений  $L_h$  — в пределах 0,05–0,09 м, частота вращения — 20–60 мин<sup>-1</sup>.

В свою очередь, направление движения гранул определялось выражением, характеризующим угол схода гранул удобрений относительно образующей конуса в определенный момент времени:

$$\beta = \arcsin \left( \frac{V_r(t)}{\sqrt{V_r^2(t) + V_\varphi^2(t)}} \right), \quad (4)$$

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

На основе полученного выражения в программе MathCad были получены аналитические зависимости, характеризующие изменение угла направления начальной скорости смешивания, при сходе гранул минеральных удобрений с конической поверхности вращающегося ротора от длительности взаимодействия и частоты вращения.

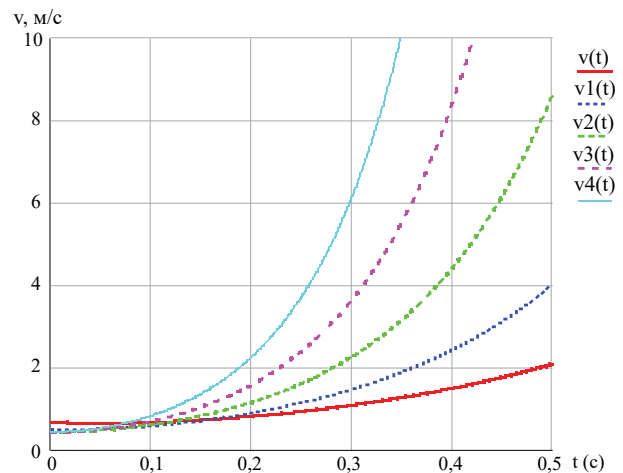
На втором этапе в камере смешивания гранулы минеральных удобрений с вращающегося конического ротора с приобретенным направлением движения и начальной скоростью смешивания ссыпаются в собирающую воронку. Так как время полета с вращающегося конического ротора до воронки незначительное, то изменение скорости гранул в полете окажется несущественным и им можно пренебречь. При сходе гранул с конического ротора частицы попадают на внутреннюю поверхность конуса (в воронку) под углом  $\beta$ , продолжая движение по заданной траектории. Проекцию движения гранул минеральных удобрений по плоскости, перпендикулярной высоте конической поверхности, можно записать:

$$\begin{cases} x = \frac{r_0 \cdot \theta}{L_0} \cdot \cos \beta_B \\ y = \frac{r_0 \cdot \theta}{L_0} \cdot \sin \beta_B \end{cases}, \quad (5)$$

Конус неподвижен, и в этом случае на поверхности конуса (воронки) на гранулу будут действовать силы инерции, тяжести, нормального давления и трения (рис. 4).

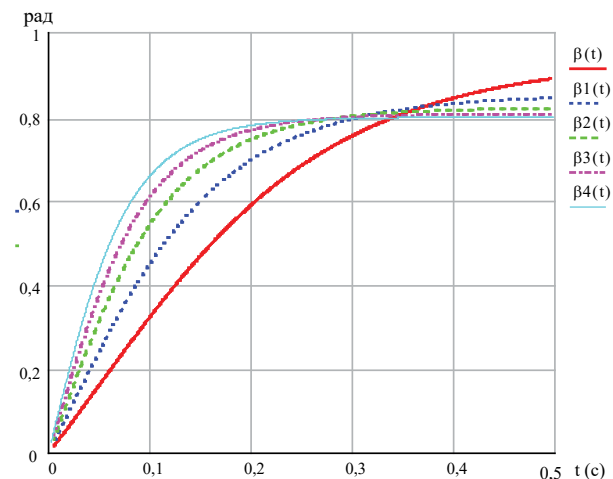
**Рис. 2.** Зависимость изменения начальной скорости смешивания от времени и частоты вращения конического ротора

**Fig. 2.** Dependence of the change in the initial mixing speed on the time and frequency of rotation of the conical rotor



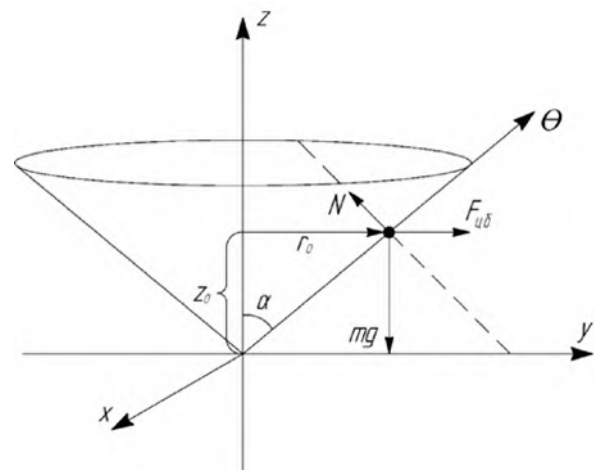
**Рис. 3.** Зависимость изменения угла направления начальной скорости смешивания относительно образующей конической поверхности от времени и частоты ее вращения

**Fig. 3.** Dependence of the change in the direction angle of the initial mixing velocity relative to the forming conical surface on the time and frequency of its rotation



**Рис. 4.** Расчетная схема к определению траектории движения гранулы минеральных удобрений по воронке

**Fig. 4.** Calculation scheme for determining the trajectory of a mineral fertilizer pellet through a funnel





Запишем уравнение движения в дифференциальной форме:

$$m \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = m \cdot g \cdot \cos \alpha_B - m \cdot \frac{V_{\varphi}^2}{r_B} \cdot \sin \alpha_B - f \cdot N, \quad (6)$$

где:  $N$  — сила реакции опоры, Н;  $m$  — масса гранулы минеральных удобрений, кг;  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha_B$  — угол наклона образующей воронки;  $f$  — коэффициент трения скольжения;  $V_{\varphi}$  — окружная скорость частицы,  $V_{\varphi} = \omega_{\Gamma} \cdot r$ , м/с.

Спроецировав силы, действующие на гранулы на  $\theta$  О1  $\psi$ , получим:

$$N - m \cdot \frac{V_{\varphi}^2}{r_B} \cdot \cos \alpha_B - m \cdot g \cdot \sin \alpha_B = 0, \quad (7)$$

Силы реакции опоры будут определяться выражением:

$$N = m \cdot \frac{V_{\varphi}^2}{r_B} \cdot \cos \alpha_B + m \cdot g \cdot \sin \alpha_B, \quad (8)$$

Угол  $\alpha_B$  будет определяться исходя из параметров конической поверхности:

$$\begin{cases} \cos \alpha_B = \frac{h_{0B}}{L_{0B}}, \\ \sin \alpha_B = \frac{r_{0B}}{L_{0B}} \end{cases}, \quad (9)$$

Преобразовав выражение (6) с учетом выражений (1), (8) и (9), получим:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = g \cdot \frac{h_{0B}}{L_{0B}} - \frac{\omega_{\Gamma}^2 \cdot r_{0B}^2}{L_{0B}^2} \cdot \theta - f \cdot \left( \frac{\omega_{\Gamma}^2 \cdot r_{0B}^2 \cdot h_{0B}}{L_{0B}^2} \cdot \theta + g \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}} \right), \quad (10)$$

Для упрощения расчетов введем следующие обозначения:

$$D = \frac{\omega_{\Gamma}^2 \cdot r_{0B}^2}{L_{0B}^2} \cdot \left( 1 + f \cdot \frac{h_{0B}}{r_{0B}} \right), \quad (11)$$

$$F = g \cdot \frac{h_{0B}}{L_{0B}} \cdot \left( 1 - f \cdot \frac{r_{0B}}{h_{0B}} \right), \quad (12)$$

Проинтегрировав представленное выражение и проведя необходимые преобразования, получим:

$$\theta(t) = \left( L_{hB} + \frac{F}{2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{\sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{F}{2D}, \quad (13)$$

Изменение координаты высоты  $z$  при движении гранул минеральных удобрений по конической поверхности (воронке) с учетом выражений (1) и (13) будет определяться:

$$z = h_{0B} \cdot \left( 1 - \left( \frac{L_{hB}}{L_{0B}} + \frac{F}{L_{0B} \cdot 2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) + \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{L_{0B} \cdot \sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) + \frac{F}{L_{0B} \cdot 2D} \right), \quad (14)$$

Движение гранул минеральных удобрений по конической поверхности с учетом выражений (5) и (13) запишем в виде:

$$\begin{cases} x = \frac{r_{0B}}{L_{0B}} \cdot \left( \left( L_{hB} + \frac{F}{2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{\sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{F}{2D} \right) \cdot \cos \beta_B \\ y = \frac{r_{0B}}{L_{0B}} \cdot \left( \left( L_{hB} + \frac{F}{2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{\sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{F}{2D} \right) \cdot \sin \beta_B \end{cases} \quad (15)$$

Окончательно система уравнений движения гранул по конической поверхности в декартовой системе координат:

$$\begin{cases} x = \frac{r_{0B}}{L_{0B}} \cdot \left( \left( L_{hB} + \frac{F}{2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{\sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{F}{2D} \right) \cdot \cos \beta_B \\ y = \frac{r_{0B}}{L_{0B}} \cdot \left( \left( L_{hB} + \frac{F}{2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{\sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) - \frac{F}{2D} \right) \cdot \sin \beta_B \\ z = h_{0B} \cdot \left( 1 - \left( \frac{L_{hB}}{L_{0B}} + \frac{F}{L_{0B} \cdot 2D} \right) \cdot ch(\sqrt{D} \cdot t) + \frac{V_{rB} \cdot \frac{r_{0B}}{L_{0B}}}{L_{0B} \cdot \sqrt{D}} \cdot sh(\sqrt{D} \cdot t) + \frac{F}{L_{0B} \cdot 2D} \right) \end{cases} \quad (16)$$

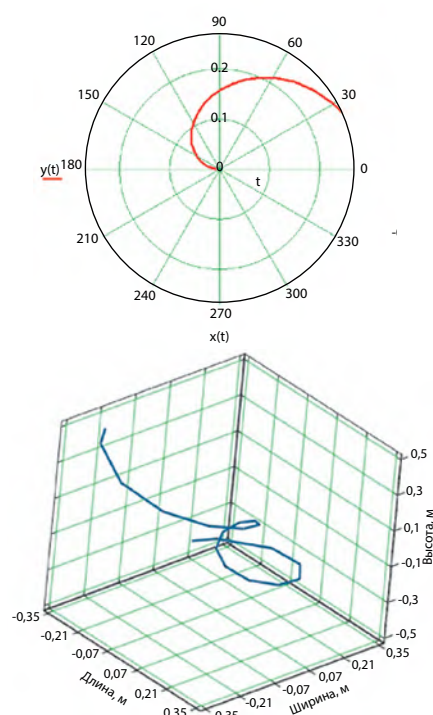
Исходя из полученной системы уравнений, в программе Mathcad были построены математические зависимости, характеризующие движение гранул минеральных удобрений (рис. 5).

Анализ полученных графиков показывает, что гранулы минеральных удобрений, поступающие в воронку, будут двигаться по ее поверхности по спиральной траектории, при этом после выхода из нее гранулы будут продолжать свое движение по данной траектории до момента столкновения с поверхностью.

В программе 3 DSMax был смоделирован процесс работы тукосмесительной установки со следующими исходными параметрами: количество гранул для каждого из бункеров составляло 10 тыс. шт., размер гранул — 5 мм, коэффициент трения между гранулами и рабочей поверхностью — 0,55.

Рис. 5. Расчетная траектория движения гранул

Fig. 5. The calculated trajectory of the granules



В результате моделирования были получены координаты движения гранул удобрения. Далее случайным образом были выбраны по две гранулы компонентов тукосмеси для каждого из бункеров. Затем в программе Statistica на основании значений изменения координат для каждой из выбранных гранул была построена траектория ее движения в смесительной камере (рис. 6).

Анализ графика показал, что в процессе движения гранул по поверхности вращающегося конуса, а также при движении по воронке их траектории будут пересекаться между собой, что будет приводить к активному смешиванию. Кроме того, в ходе моделирования оценивалось качество смешивания получаемой смеси при различной частоте вращения ротора — от 20 до 90 мин<sup>-1</sup>. Для этого на выходе из собирающей воронки была установлена модель емкости объемом 1 м<sup>3</sup>, куда ссыпались все гранулы минеральных удобрений. После окончания процесса симуляции смешивания из 5 различных уровней емкости отбирались по 3 участка составляющих (1 см<sup>3</sup> каждый), в которых оценивалось количество гранул каждого цвета, далее на основе полученных данных определялся коэффициент неоднородности смеси  $k_c$ . В результате были определены значения коэффициента неоднородности получаемой смеси при заданных параметрах коэффициента трения (рис. 7).

Анализ изменения значений коэффициента неоднородности смешивания свидетельствует о том, что с ростом увеличения частоты вращения ротора наблюдается снижение значения данного показателя, при этом эффективные значения частоты вращения конического ротора лежат в диапазоне от 40 до 70 мин<sup>-1</sup>. С дальнейшим увеличением частоты вращения наблюдается значительное ухудшения показателя, отражающего однородность смешивания. Полученные данные позволяют говорить о том, что в указанном диапазоне наблюдаются оптимальные траектории движения гранул минеральных удобрений в камере смешивания.

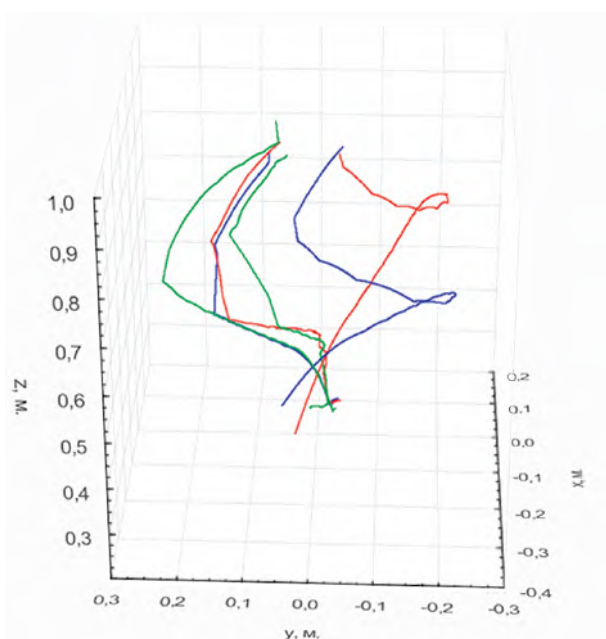
### Выводы/Conclusions

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что движение гранул минеральных удобрений происходит по спиральной траектории и определяется направлением начальной скорости смешивания, задающейся на вращающемся коническом роторе. Так как гранулы минеральных удобрений имеют различные начальные положения, то в процессе их перемещения в камере смешивания наблюдается многократное пересечение их траекторий, в результате которого происходит их смешивание.

В нижней части воронки камеры смешивания и на выходе из нее наблюдаются наибольшая плотность гранул минеральных удобрений и наиболее активное пересечение и изменение их траекторий за счет их соударения. После выхода из воронки гранулы минеральных удобрений продолжают свое хаотическое движение по приобретенным траекториям до момента соударения их с поверхностью в камере обработки биопрепаратами.

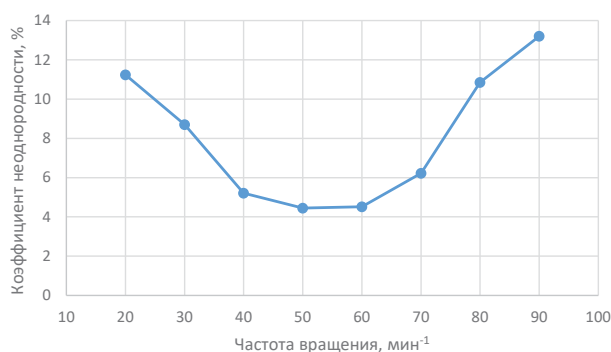
**Рис. 6.** График движения гранул на основе данных компьютерного моделирования

**Fig. 6.** Graph of granule movement based on computer simulation data



**Рис. 7.** Изменение коэффициента неоднородности смешивания от частоты вращения ротора

**Fig. 7.** Variation of the mixing inhomogeneity coefficient from the rotor speed



В свою очередь, на эффективность смешивания оказывает существенное влияние частота вращения конического ротора. Так, при значениях частоты вращения менее 40 мин<sup>-1</sup> и более 70 мин<sup>-1</sup> наблюдается рост коэффициента неоднородности до значений, превышающих 10%, что свидетельствует о неэффективности смешивания. Принято считать хорошим смешиванием, если значения неравномерности в тукосмесях не превышают 10% [17]. Рациональными же параметрами частоты вращения можно считать значения в диапазоне от 40 до 70 мин<sup>-1</sup>, в которых значение коэффициента неоднородности в среднем составляет 5,1%.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марченко Л.А., Личман Г.И., Смирнов И.Г., Мочкова Т.В., Колесникова В.А. Дифференцированное внесение удобрений и пестицидов с использованием беспилотных летательных аппаратов. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017; 3: 17–23. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-17-23>
2. 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>
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. 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>
5. Алферьев В.П., Павлова Г.С., Федотов А.В., Жукова О.И., Жуковина С.Е. Поддержка обеспечения сельского хозяйства минеральными удобрениями. *Техника и оборудование для села*. 2011; 7: 10–14. <https://elibrary.ru/nxsdcg>
6. Личман Г.И., Белых С.А., Марченко А.Н. Способы внесения удобрений в системе точного земледелия. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018; 12(4): 4–9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9>
7. 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>
8. Nogalska A., Czapla 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.
9. Белоусов И.Е., Кремзин Н.М. Эффективность применения полиэлементных тукоосмесей в рисоводстве. *Достижения науки и техники АПК*. 2016; 30(8): 40–41. <https://www.elibrary.ru/wjztnl>
10. Митрофанов С.В., Орлова Н.В., Благов Д.А., Панферов Н.С., Тетерин В.С. Анализ тенденций развития тукоосмесительного оборудования. *Аграрная наука*. 2023; 6: 98–110. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-98-110>
11. Рычков В.А., Катаев А.А., Смагин А.В. Приготовление тукоосмесей в условиях хозяйств. *Техника в сельском хозяйстве*. 2010; 1: 37–38. <https://www.elibrary.ru/nordur>
12. Францкевич В.С., Высоцкая Н.А., Дворник А.П. Гранулирование сложносмешанных удобрений в барабанном грануляторе-сушилке. *Механика. Исследования и инновации*. 2021; 14: 226–233. <https://www.elibrary.ru/mnwokm>
13. Гайбарян М.А., Сидоркин В.И., Гапеева Н.Н. Оптимизация структурного построения технологического процесса тукоосмешения 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>
14. Лачуга Ю.Ф., Измаилов А.Ю., Лобачевский Я.П., Шогенов Ю.Х. Результаты научных исследований агроинженерных научных организаций по развитию цифровых систем в сельском хозяйстве. *Техника и оборудование для села*. 2022; 3: 2–9. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-3-2-9>
15. Новиков Н.Н., Рычков В.А., Тихонова О.В., Ариткин А.Г. О приготовлении модифицированных минеральных удобрений в условиях сельскохозяйственных предприятий. *Проблемы механизации агрохимического обеспечения сельского хозяйства*. 2016; 10: 185–192. <https://www.elibrary.ru/zfclz>
16. Тетерин В.С., Панферов Н.С., Пехнов С.А., Пестряков Е.В., Овчинников А.Ю. Теоретическое исследование рабочего органа тукоосмесительной установки центробежного типа. *Аграрная наука*. 2024; 2: 120–126. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-120-126>
17. Воронин В.В., Адигамов К.А., Петренко С.С., Сизякин Р.А. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов. *Инженерный вестник Дона*. 2012; 4–2: 36. <https://elibrary.ru/pvjcd>

## REFERENCES

1. Marchenko L.A., Lichman G.I., Smirnov I.G., Mochkova T.V., Kolesnikova V.A. Variable rate application of fertilizers and pesticides using unmanned aerial vehicles. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017; 3: 17–23 (in Russian). <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2017-3-17-23>
2. Panferov N.S., Teterin V.S., Mitrofanov S.V., Blagov D.A., Pehnov 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>
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. 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>
5. Alferiev V.P., Pavlova G.S., Fedotov A.V., Zhucova O.I., Zhucovina S.E. Government support of agriculture for fertilizers. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2011; (7): 10–14 (in Russian). <https://elibrary.ru/nxsdcg>
6. Lichman G.I., Belykh S.A., Marchenko A.N. Methods of applying fertilizers in precision agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018; 12(4): 4–9. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-4-4-9>
7. 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>
8. Nogalska A., Czapla 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.
9. 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>
10. 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>
11. Rychkov V.A., Kataev A.A., Smagin A.V. Preparation of fertilizer mixtures in the conditions of economies. *Tekhnika v selskom khozyaystve*. 2010; 1: 37–38 (in Russian). <https://www.elibrary.ru/nordur>
12. 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>
13. 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>
14. Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Shogenov Yu.Kh. The results of scientific research of agro-engineering scientific organizations on the development of digital systems in agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022; 3: 2–9 (in Russian). <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-3-2-9>
15. 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>
16. 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; 2: 120–126 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-379-2-120-126>
17. Voronin V.V., Adigamov K.A., Petrenko S.S., Siziakin R.A. Criteria and methods for assessing the quality of the mixing of bulk materials. *Engineering Journal of Don*. 2012; 4–2: 36 (in Russian). <https://elibrary.ru/pvjcd>

## ОБ АВТОРАХ

**Владимир Сергеевич Тетерин<sup>1</sup>**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отдела возделывания и уборки  
овощных культур открытого грунта  
v.s.teterin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>

**Николай Сергеевич Панферов<sup>1</sup>**

кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник отдела возделывания и уборки  
овощных культур открытого грунта  
nikolaj-panfyorov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7431-7834>

**Сергей Александрович Пехнов<sup>1</sup>**

старший научный сотрудник отдела возделывания и уборки  
овощных культур открытого грунта  
pehnov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9471-6074>

**Сергей Владимирович Митрофанов<sup>2</sup>**

кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора  
по научной работе  
f-mitrofanoff2015@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0657-7148>

<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,  
1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Россия

<sup>2</sup> Высшая школа экономики,  
Покровский бульвар 11, Москва, 109028, Россия

## ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir Sergeevich Teterin<sup>1</sup>**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher of the Department  
of Cultivation and Harvesting of Open-ground Vegetable Crops  
v.s.teterin@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8116-723X>

**Nikolai Sergeevich Panferov<sup>1</sup>**

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Researcher of the Department of Cultivation and Harvesting  
of Open-ground Vegetable Crops  
nikolaj-panfyorov@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-7431-7834>

**Sergey Alexandrovich Pekhanov<sup>1</sup>**

Senior Researcher of the Department  
of Cultivation and Harvesting of Open-ground Vegetable Crops  
pehnov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9471-6074>

**Sergey Vladimirovich Mitrofanov<sup>2</sup>**

Candidate of Agricultural Sciences,  
Deputy Director for Scientific Work  
f-mitrofanoff2015@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0657-7148>

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

<sup>2</sup> Higher School of Economics,  
11 Pokrovsky avenue, Moscow, 109028, Russia