

Вестник Череповецкого государственного университета. 2024. № 3 (120). С. 55–67.
Cherepovets State University Bulletin, 2024, no. 3 (120), pp. 55–67.

Научная статья

УДК 543.053

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-3-120-5>

EDN: TFVVEN

**Математическое моделирование параметров для системы управления
отбором представительной пробы минеральных удобрений
при движении их на конвейере**

**Константин Аркадьевич Харахнин^{1✉}, Виктор Александрович Шабалов^{2✉},
Валерий Васильевич Соколов³, Максим Николаевич Надежин⁴,
Александра Ивановна Фоменко⁵**

^{1,2,3,4,5}Череповецкий государственный университет,
Череповец, Россия

¹kakharakhnin@chsu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4532-286X>

²vashabalov@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-3626>

³vvsokolov@chsu.ru

⁴mn.nadezhin@gmail.com

⁵fomenko1212@inbox.ru

Аннотация. В статье разработано математическое описание и выполнено моделирование параметров для системы управления отбором пробы минеральных удобрений при движении их на конвейере, определены параметры для вакуум-насоса и равнодействующая сила, действующая на всасывающую трубу со стороны потока удобрений и поперечной силы трения.

Ключевые слова: моделирование параметров, отбор пробы, представительная проба, параметры системы управления, вакуум-насос

Для цитирования: *Харахнин К. А., Шабалов В. А., Соколов В. В., Надежин М. Н., Фоменко А. И.* Математическое моделирование параметров для системы управления отбором представительной пробы минеральных удобрений при движении их на конвейере // Вестник Череповецкого государственного университета. 2024. № 3 (120). С. 55–67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-3-120-5>; EDN: TFVVEN

Mathematical modeling of parameters for the control system for the selection of a representative sample of mineral fertilizers during their movement on the conveyor

Konstantin A. Kharakhnin^{1✉}, Viktor A. Shabalov^{2✉}, Valery V. Sokolov³,
Maxim N. Nadezhin⁴, Alexandra I. Fomenko⁵
^{1,2,3,4,5} Cherepovets State University,
Cherepovets, Russia

¹kakharakhnin@chsu.ru, <https://orcid.org/0009-0008-4532-286X>

²vashabalov@chsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7223-3626>

³vvsokolov@chsu.ru

⁴mn.nadezhin@gmail.com

⁵fomenko1212@inbox.ru

Abstract. In the article, a mathematical description has been developed and the parameters for the control system for sampling mineral fertilizers as they move on a conveyor have been modeled; the authors have also identified the parameters for the vacuum pump and the resultant force acting on the suction pipe from the flow of fertilizers and the transversal friction force.

Keywords: modeling of parameters, sampling, representative sample, control system parameters, vacuum pump

For citation: Kharakhnin K. A., Shabalov V. A., Sokolov V. V., Nadezhin M. N., Fomenko A. I. Mathematical modeling of parameters for the control system for the selection of a representative sample of mineral fertilizers during their movement on the conveyor. *Cherepovets State University Bulletin*, 2024, no. 3 (120), pp. 55–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2024-3-120-5>; EDN: TFVVEN

Введение

Для контроля качества минеральных удобрений проводится отбор проб. Проведение отбора реализуется вручную персоналом лаборатории или производства. Основным требованием к пробе является ее представительность¹. Методы отбора и подготовки проб регламентированы стандартами ГОСТ 21560.0² и ГОСТ EN 1482-1-2013³. Отбор проб производится на открытых частях ленточных конвейеров и узлах пересыпа. Анализ гранулометрического состава выполняется в лабораторных условиях. Применяются установки для ситового анализа⁴ и программно-аппаратные комплексы, основанные на динамическом⁵ и статическом¹ методах анализа изображений.

¹ Шабалин К. Система отбора представительной пробы // Добывающая промышленность. 2020. № 1 (19). С. 120–121.

² ГОСТ 21560.0-82. Удобрения минеральные. Методы отбора и подготовки проб. Москва: Издательство стандартов, 2003. 13 с.

³ ГОСТ EN 1482-1-2013. Удобрения и известковые материалы. Отбор и подготовка проб. Ч. 1. Отбор проб. Москва: Стандартинформ, 2014. 41 с.

⁴ Сравнение методов определения характеристик частиц. URL: <https://www.microtrac.com/ru/applications/knowledge-base/different-particle-analysis-techniques-compared/> (дата обращения: 15.11.2023).

⁵ ISO 13322-2:2021. Particle size analysis. Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods. Geneva: International Organization Standardization, 2021. 60 p.

Для реализации оперативного контроля гранулометрического состава минеральных удобрений на предприятиях химической промышленности применяются программно-аппаратные комплексы², в состав которых входят устройство отбора проб, блок подготовки пробы к анализу и анализатор гранулометрического состава. Автоматический отбор проб минеральных удобрений может выполняться с помощью пересечных и маятниковых пробоотборников³.

Пересечной пробоотборник используется для отбора проб материалов на месте пересыпа ленточного конвейера или из падающего потока. Этот принцип отбора проб основан на применении ковша с определенной шириной щели, перпендикулярной входящему потоку материала, который захватывает всю толщину потока материала с постоянной скоростью. Маятниковый пробоотборник используется для отбора проб с ленточных конвейеров. Принцип отбора проб пробоотборника похож на принцип работы отсекаателя рамы для отбора проб с остановленной ленты.

Маятниковый пробоотборник направляет эту раму с закрытым задним ребром круговым движением через движущийся поток материала на ленте. Пересечной и маятниковый пробоотборники обеспечивают автоматический отбор представительной пробы. Однако такие пробоотборники представляют собой сложные электро-механические системы, устанавливаемые стационарно. Обслуживание и ремонт таких пробоотборников требует остановки конвейера. В этой связи актуальной является задача разработки мобильного пробоотборника, конструктивно независимого от оборудования ленточного конвейера.

Основная часть

В Череповецком государственном университете на кафедре киберфизических систем разработана система отбора представительной пробы при движении гранул удобрения на конвейере. Предлагаемый способ отбора позволяет отбирать пробу как в разных слоях по высоте насыпи, так и по ее длине, это позволяет учесть сегрегацию и фракционный состав минеральных удобрений. Функциональная схема системы показана на рис. 1.

¹ ISO 13322-1:2014. Particle size analysis. Image analysis methods. Part 1: Static image analysis methods. Geneva: International Organization Standardization, 2014. 24 p.

² Yunovidov D. V., Shabalov V. A., Sokolov V. V. Method of Industrial Automated Optical-Electronic Control of Granulometric Composition of Mineral Fertilizers. Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR 2019). (October 11–13, 2019, Prague, Czech Republic). New York: Association for Computing Machinery, 2019. P. 86–89; Yunovidov D., Menshikov K., Sidorova E. Robotic Control System for Particles Size Distribution of industrially Produced Mineral Fertilizers // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 1560–1565; Yunovidov D. V. Shabalov V. A., Menshikov K. A. Robotic System of Optical Control and Data Acquisition for Analyzing the Physical Properties of Industrially Produced Mineral Fertilizer Granules // XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). (November 19–21, 2021, Novosibirsk, Russia). Newark: IEEE, 2021. P. 428–433.

³ Отбор и подготовка проб. Отдельные машины и системы. URL: https://ru.siebtechniktema.com/wp-content/uploads/2020/06/wb240russ_probenahme_2021-1.pdf (дата обращения: 15.11.2023).

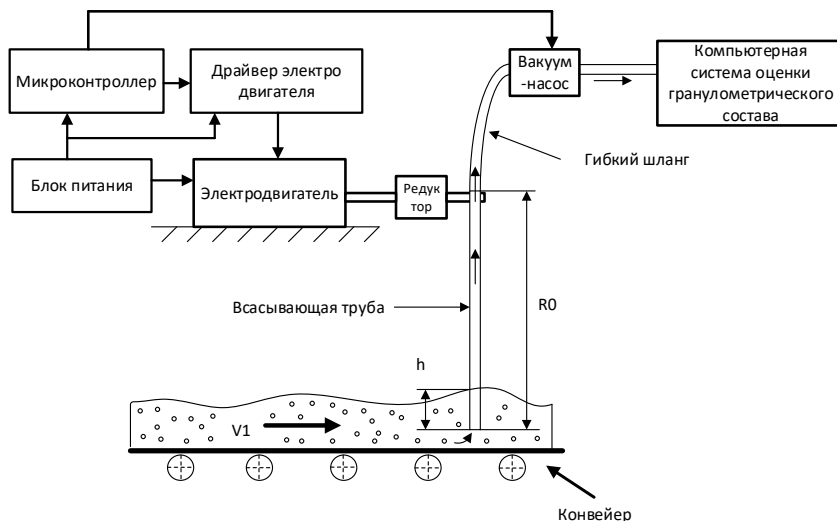


Рис. 1. Функциональная схема системы отбора проб с ленты конвейера

Микроконтроллер формирует управляющее воздействие через драйвер на электродвигатель, который совершает возвратно-поступательное движение всасывающей трубы в пределах потока гранул на ленте конвейера. Одновременно с управлением движения трубы микроконтроллер формирует сигнал на вакуум-насос, который всасывает гранулы и передает их в делитель Джонса. В результате формируется представительная проба, в дальнейшем поступающая в компьютерную систему оценки гранулометрического состава.

Рассмотрим движение всасывающей трубы в потоке гранул удобрения, представленное на рис. 2.

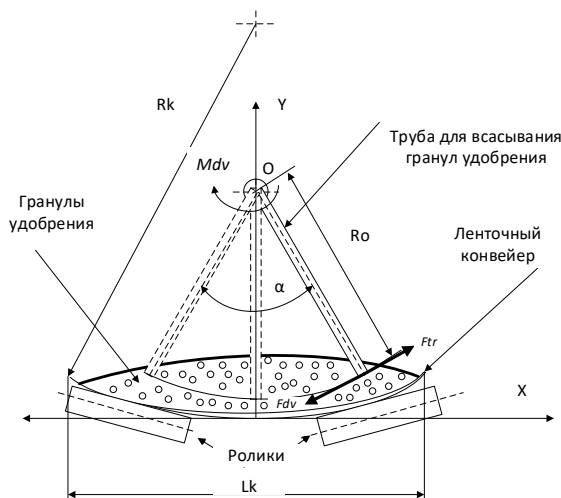


Рис. 2. Схема движения всасывающей трубы в потоке гранул удобрения

На рис. 2 обозначено: R_k – радиус кривизны ленты конвейера; R_o – длина трубы для всасывания гранул удобрения, $R_o = 0.5 - 0.8$ м; L_k – ширина ленты конвейера, $L_k = 1,2$ м; α – угол поворота трубы для всасывания гранул удобрения при движении из одного крайнего положения в другое, ограниченное размерами ленточного конвейера.

Труба для всасывания гранул закреплена на оси O и связана своим выходным отверстием с вакуум-насосом (на рис. 2 не показан). Нижний конец трубы погружен в гранулы удобрения на конвейере и совершает периодическое движение по часовой и против часовой стрелки, не выходя за пределы потока гранул. Вакуум-насос включается во время перемещения трубы в верхних, средних и нижних слоях потока гранул, обеспечивая, таким образом, получение пробы, поступающей в делитель Джонса.

Рассмотрим математическую модель процесса отбора с целью определения параметров системы. Уравнение динамики электропривода всасывающей трубы имеет вид:

$$J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M_{dv} - M_{tr}, \quad (1)$$

где J – момент инерции, приведенный к валу электродвигателя, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; M_{dv} – момент, создаваемый электродвигателем, перемещающим трубу, Нм; M_{tr} – момент сил сопротивления, вызываемый при движении трубы через гранулы удобрения, Нм; α – угол поворота трубы в потоке гранул удобрения, рад.

Конец всасывающей трубы перемещается по дуге. Расстояние L определяется по формуле:

$$L = \alpha R_o. \quad (2)$$

Уравнение динамики электропривода всасывающей трубы, выраженное через силы, действующие на погруженную в гранулы область трубы, имеет вид:

$$J \cdot \frac{d^2\alpha}{dt^2} = R_o (F_{dv} - F_{tr}). \quad (3)$$

Расход Q ($\text{м}^3/\text{с}$) гранул удобрения через трубу рассчитывается по формуле:

$$Q = S \cdot V = \frac{\pi d^2}{4} \cdot V, \quad (4)$$

где V – линейная скорость потока гранул через всасывающую трубу, $\text{м}/\text{с}$; S – площадь поперечного сечения всасывающей трубы, м^2 ; d – внутренний диаметр всасывающей трубы, м.

Из выражения (4) определяется необходимый внутренний диаметр всасывающей трубы:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} . \quad (5)$$

Массовый расход M (кг/с) через трубу определяется по выражению:

$$M = Q \cdot \rho , \quad (6)$$

где ρ – насыпная плотность, кг/м³.

При движении всасывающей трубы перпендикулярно центральной оси ленточно-го конвейера последняя оставляет траекторию (след) в потоке гранул удобрения, показанную на рис. 3. Выбор периода движения трубы из начального положения в противоположное и обратно будет определять скорость линейного перемещения трубы при известной скорости ленточного конвейера с потоком гранул удобрения.

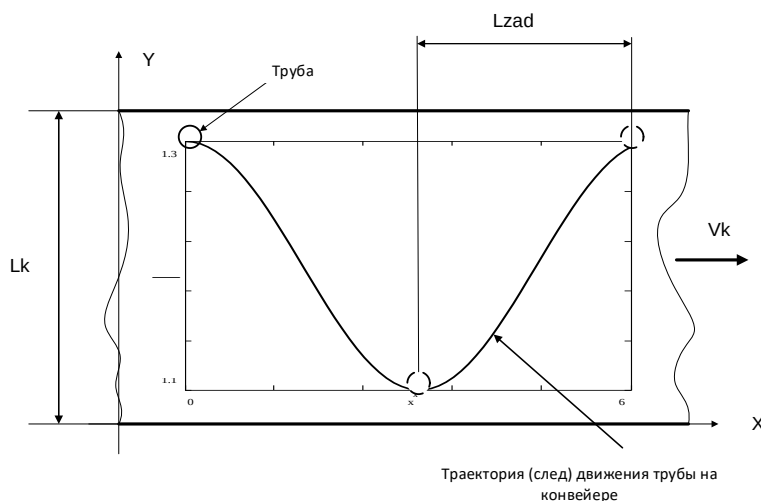


Рис. 3. Траектория (след) в потоке гранул удобрения, оставляемая трубой

Линейная скорость движения трубы V_{tr} перпендикулярно центральной линии конвейера определяется по выражению:

$$V_{tr} = \frac{L_k \cdot V_k}{L_{zad}} , \quad (7)$$

где L_k – ширина конвейера, м; V_k – линейная скорость ленточного конвейера с потоком гранул, м/с; L_{zad} – заданная длина потока гранул на конвейере, на которой требуется взять пробу, м.

Со стороны потока гранул на движущуюся трубу действуют сила F_{tr} , и в то же время необходимо преодолевать силу P (см. рис. 4).

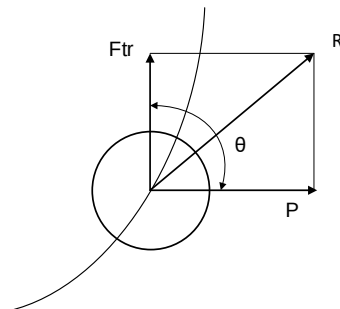


Рис. 4. Силы, действующие на движущуюся трубу в потоке гранул удобрения

Определим равнодействующую R сил, действующих на всасывающую трубу:

$$R = \sqrt{F_{tr}^2 + P^2 + 2 \cdot F_{tr} \cdot P \cdot \cos(\theta)}. \quad (8)$$

Угол θ в формуле (8) равен 90° (см. рис. 4).

Определим горизонтальную силу давления потока P гранул, движущихся на конвейере на поверхность трубы с целью оценки момента сопротивления движению трубы M_{tr} и жесткости трубы к изгибу.

Рассмотрим схему взаимодействия потока гранул с поверхностью всасывающей трубы, представленную на рис. 5.

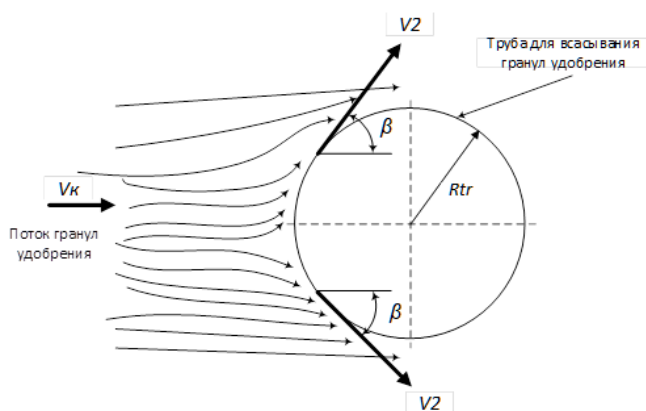


Рис. 5. Схема взаимодействия потока гранул с поверхностью всасывающей трубы

На рис. 5. обозначено: V_k – линейная скорость движения потока гранул удобрения, м/с; V_2 – линейная скорость движения потока гранул, столкнувшихся с поверх-

ностью трубы; β – угол между вектором линейной скорости V_2 и горизонтальной плоскостью; R_{tr} – радиус трубы, м.

Согласно теореме Эйлера о количестве движения, для указанной схемы можно записать выражение:

$$M_k \cdot V_k - M_k \cdot V_2 + R_{об} + R_{пов} = 0, \quad (9)$$

где $M_k V_k$ – количество движения массы гранул удобрения, воздействующих на поверхность всасывающей трубы в единицу времени с линейной скоростью V_k ; $M_k V_2$ – количество движения массы гранул удобрения, обтекающих поверхность всасывающей трубы в единицу времени с линейной скоростью V_2 ; $R_{об}$ – главный вектор объемных сил; $R_{пов}$ – главный вектор поверхностных сил, действующих на поверхность трубы.

Проектируя геометрическую сумму (9) на горизонталь, получим:

$$M_k \cdot V_k - M_k \cdot V_2 \cos \beta + 0 + R_{пов} = 0. \quad (10)$$

Главный вектор объемных сил $R_{об} = 0$, поскольку отсутствует замкнутый объем, в котором движутся гранулы.

Из выражения (10) получим силу давления P , действующую на поверхность трубы:

$$P = -R_{пов} = M_k (V_k + V_2 \cos \beta). \quad (11)$$

Секундная масса гранул удобрения, движущихся на трубу, определяется выражением:

$$M_k = \pi \cdot R_{tr} \cdot h \cdot V_k \cdot \rho, \quad (12)$$

где h – глубина погружения трубы в поток гранул, м.

Окончательно для горизонтальной силы P воздействия на поверхность трубы:

$$P = \pi \cdot R_{tr} \cdot h \cdot \frac{V_k \cdot \gamma}{g} (V_k + V_2 \cos \beta). \quad (13)$$

Аналогичное выражение для силы сопротивления F_{tr} движения трубы перпендикулярно оси конвейера:

$$F_{tr} = \pi \cdot R_{tr} \cdot h \cdot \frac{V_{tr} \cdot \gamma}{g} (V_k + V_2 \cos \beta). \quad (14)$$

С учетом выражения (7) получим:

$$F_{tr} = \pi \cdot R_{tr} \cdot h \cdot \frac{L_k \cdot V_k \cdot \gamma}{L_{zad} g} \left(\frac{L_k \cdot V_k}{L_{zad}} + V_2 \cos \beta \right). \quad (15)$$

В выражении (14) вместо скорости движения гранул удобрения (конвейера) используется линейная скорость трубы V_{tr} :

$$R = \sqrt{F_{tr}^2 + P^2}. \quad (16)$$

Подставим в (16) выражения (13) и (15), выполним преобразования, получим выражение для равнодействующей силы, действующей на движущуюся трубу:

$$R = \pi \cdot R_{tr} \cdot h \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot V_k \sqrt{\frac{L_r^2}{L_{zad}^2} \left[\left(\frac{L_k \cdot V_k}{L_{zad}} + V_2 \cos \beta \right)^2 + (V_k + V_2 \cos \beta)^2 \right]}. \quad (17)$$

Установим зависимости равнодействующей силы от скорости конвейера V_k и заданного расстояния по длине конвейера L_{zad} , на котором требуется взять пробу.

На рис. 6 показана зависимость $R = F(V_k)$ при следующих входных данных: ширина конвейера $L_k = 1,2$ м; глубина погружения трубы в поток гранул $h = 0,1$ м; радиус всасывающей трубы $R_{tr} = 0,03$ м; удельный вес гранул удобрения $\gamma = 9,81 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \text{с}^2}$; заданная длина потока $L_{zad} = 2$ м; угол $\beta = 45^\circ$; ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

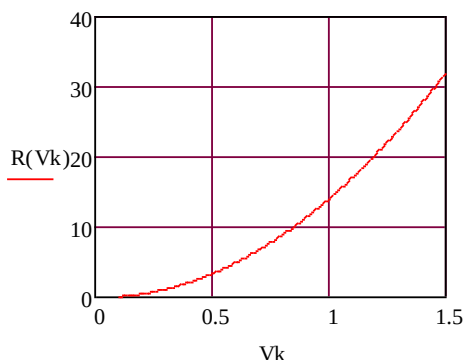


Рис. 6. Зависимость равнодействующей силы от линейной скорости конвейера V_k

Как видно из графика, зависимость имеет параболический характер, с увеличением скорости потока гранул до 1,5 м/с равнодействующая сила возрастает до 33 Н.

На рис. 7 представлена зависимость равнодействующей силы от заданного расстояния по длине потока, на котором необходимо взять пробу.

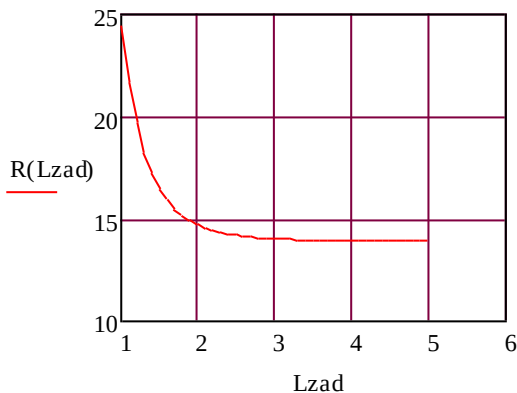


Рис. 7. Зависимость равнодействующей силы от L_{zad}

Зависимость $R = F(L_{zad})$ показывает, что с увеличением выбранного расстояния от 1 до 5 м равнодействующая сила уменьшается с 25 Н до 14 Н. Объясняется это тем, что необходимо снижать линейную скорость движения трубы, а это приводит к уменьшению составляющей F_{tr} , в результате снижается R .

Проведем расчеты, необходимые для выбора параметров вакуум-насоса и электропривода, считая, что масса пробы должна быть 150 г. Полагаем, что массовый расход, обеспеченный вакуум-насосом за 1 сек, составляет $M = 0,03$ кг, тогда необходимая масса пробы будет набрана за 5 сек. Примем насыпную плотность равной $\rho = 700$ кг/м³, тогда необходимый расход гранул удобрения через трубу составит $Q = M / \rho = 4,3 \cdot 10^{-5}$ м³/ч. Зададим диаметр трубы $d = 0,03$ м и определим необходимую скорость потока гранул в трубе, которую должен обеспечить вакуум-насос $V = 4Q/(\pi d^2) = 0,015$ м/с.

Примем длину всасывающей трубы равной $R_o = 0,6$ м. Время перемещения трубы из начального положения в конечное составляет $t = 5$ с. Линейная скорость перемещения конца трубы в потоке гранул $V_{tr} = 0,1$ м/с. Определим угол поворота трубы $\alpha = V_{tr}t/R_o = 0,833$ рад. (в градусах это составляет 48°, при этом длина дуги, по которой будет перемещаться конец трубы, будет составлять $L = 0,5$ м).

Выводы

1. Разработана система отбора пробы минеральных удобрений при движении их на конвейере, основанная на совмещении вакуумного и маятникового методов. Такое решение обеспечивает мобильность системы отбора и выполнение требования представительности пробы.
2. Определены технические параметры для выбора вакуум-насоса как основного элемента системы отбора пробы.

3. Получена математическая модель равнодействующей силы, действующей на трубу проботборника при ее движении в потоке гранул.

4. С увеличением выбранного заданного расстояния по длине потока, на котором необходимо взять пробу, должна уменьшаться линейная скорость трубы, что приводит к уменьшению составляющей силы трения F_{tr} и равнодействующей R .

Список источников

ГОСТ 21560.0-82. Удобрения минеральные. Методы отбора и подготовки проб. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. 13 с.

ГОСТ EN 1482-1-2013. Удобрения и известковые материалы. Отбор и подготовка проб. Ч. 1. Отбор проб. Москва: Стандартинформ, 2014. 41 с.

Отбор и подготовка проб. Отдельные машины и системы. URL: https://ru.siebtechnik-tema.com/wp-content/uploads/2020/06/wb240russ_probenahme_2021-1.pdf (дата обращения: 15.11.2023).

Сравнение методов определения характеристик частиц. URL: <https://www.microtrac.com/ru/applications/knowledge-base/different-particle-analysis-techniques-compared/> (дата обращения: 15.11.2023).

Шабалин К. Система отбора представительной пробы // Добывающая промышленность. 2020. № 1 (19). С. 120–121.

ISO 13322-1:2014. Particle size analysis. Image analysis methods. Part 1: Static image analysis methods. Geneva: International Organization Standardization, 2014. 24 p.

ISO 13322-2:2021. Particle size analysis. Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. 60 p.

Yunovidov D., Menshikov K., Sidorova E. Robotic Control System for Particles Size Distribution of industrially Produced Mineral Fertilizers // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 1560–1565.

Yunovidov D. V. Shabalov V. A., Menshikov K. A. Robotic System of Optical Control and Data Acquisition for Analyzing the Physical Properties of Industrially Produced Mineral Fertilizer Granules // XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). (November 19–21, 2021, Novosibirsk, Russia). Newark: IEEE, 2021. P. 428–433.

Yunovidov, D. V., Shabalov, V. A., Sokolov, V. V. Method of Industrial Automated Optical-Electronic Control of Granulometric Composition of Mineral Fertilizers // Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR 2019). (October 11–13, 2019, Prague, Czech Republic). New York: Association for Computing Machinery, 2019. P. 86–89.

References

GOST 21560.0-82. *Udobreniia mineral'nye. Metody otbora i podgotovki prob* [GOST 21560.0-82. Mineral fertilisers. Methods of selection and preparation of samples]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2003. 13 p.

ГОСТ EN 1482-1-2013. *Udobreniia i izvestkovye materialy. Otbor i podgotovka prob. Ch. 1. Otbor prob* [GOST EN 1482-1-2013. Fertilisers and liming materials. Selection and preparation of samples. Part 1. Sampling]. Moscow: Standartinform, 2014. 41 p.

Otbor i podgotovka prob. Otdel'nye mashiny i sistemy [Sampling and preparation of samples. Individual machines and systems]. Available at: https://ru.siebtechnik-tema.com/wp-content/uploads/2020/06/wb240russ_probenahme_2021-1.pdf (accessed: 15.11.2023).

Sravnienie metodov opredeleniia kharakteristik chastits [Comparison of particle characterisation methods]. Available at: <https://www.microtrac.com/ru/applications/knowledge-base/different-particle-analysis-techniques-compared/> (accessed: 15.11.2023).

Shabalin K. Sistema otbora predstavitel'noi proby [System of representative sample selection]. *Dobyvaiushchaia promyshlennost'* [Mining Industry], 2020, no. 1 (19), pp. 120–121.

ISO 13322-1:2014. *Particle size analysis. Image analysis methods. Part 1: Static image analysis methods*. Geneva: International Organization Standardization, 2014. 24 p.

ISO 13322-2:2021. *Particle size analysis. Image analysis methods. Part 2: Dynamic image analysis methods*. Geneva: International Organization for Standardization, 2021. 60 p.

Yunovidov D., Menshikov K., Sidorova E. Robotic control system for particles size distribution of industrially produced mineral fertilizers. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 1560–1565.

Yunovidov D. V. Shabalov V. A., Menshikov K. A. Robotic system of optical control and data acquisition for analyzing the physical properties of industrially produced mineral fertilizer granules. *XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. (November 19–21, 2021, Novosibirsk, Russia). Newark: IEEE, 2021, pp. 428–433.

Yunovidov D. V., Shabalov V. A., Sokolov V. V. Method of industrial automated optical-electronic control of granulometric composition of mineral fertilizers. *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Automation, Control and Robots (ICACR 2019)*. (October 11–13, 2019, Prague, Czech Republic). New York: Association for Computing Machinery, 2019, pp. 86–89.

Сведения об авторах

Константин Аркадьевич Харахнин – кандидат технических наук, доцент; kakharakhnin@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Konstantin A. Kharakhnin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; kakharakhnin@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Виктор Александрович Шабалов – кандидат технических наук, доцент; vashabalov@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Victor A. Shabalov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, vashabalov@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Валерий Васильевич Соколов – кандидат технических наук, доцент; vvsokolov@chsu.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Valery V. Sokolov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, vashabalov@chsu.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Максим Николаевич Надежин – аспирант; mn.nadezhin@gmail.com, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Maxim N. Nadezhin** – Postgraduate Student; mn.nadezhin@gmail.com, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Александра Ивановна Фоменко – доктор технических наук, профессор; fomenko1212@inbox.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 Череповец, Россия); **Alexandra I. Fomenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor; fomenko1212@inbox.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Заявленный вклад авторов: авторы сделали разный вклад в подготовку публикации, что отражено в последовательности персоналий авторского коллектива. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors made different contributions to the preparation of the publication, which is reflected in the sequence of personalities of the author's team. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.10.2023; одобрена после рецензирования 26.11.2023; принята к публикации 11.12.2023.

The article was submitted 24.10.2023; Approved after reviewing 26.11.2023; Accepted for publication 11.12.2023.