

Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2022. – No. 6 (212). – S. 108-114.

5. Titov V. Yu. Povyshenie effektivnosti bytovykh elektroinkubatorov za schet ispolzovaniya v nikh rezervnoy sistemy elektronagreva i ventilyatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.02. – Saratov, 1999.

6. Kyeremeh, F., Forson P. (2017). Design and Construction of an Arduino Microcontroller-based EGG Incubator. *International Journal of Computer Applications*. 168. 15-23. DOI: 10.5120/ijca2017914261.

7. Neverov E.N. Razrabotka inkubatora na baze mikrokontrollera Arduino dlya vyvedeniya selskokhozyaystvennoy ptitsy / E.N. Neverov, G.S. Shirmanova, A.K. Gorelkina, A.A. Vladimirov // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva. – 2024. – T. 16, No. 4. – S. 122-130.

8. Dagaev K. V. Modernizatsiya algoritma upravleniya temperatury v inkubatore / K. V. Dagaev

// Vestnik magistratury. – 2016. – No. 1-1 (52). – S. 83-87.

9. Rusak S.N. Kompyuternoe modelirovanie protsessa nagrevaniya bytovogo inkubatora / S.N. Rusak // V mire nauchnykh otkrytiy. – 2014. – No. 6-1 (54). – S. 350-362.

10. Rusak S.N. Proektirovanie sistemy upravleniya bytovym inkubatorom / S.N. Rusak, N.S. Strigun // V mire nauchnykh otkrytiy. – 2014. – No. 6-1 (54). – S. 363-375.

11. Varenov A.A. Analiz dinamicheskikh protsessov v sisteme stabilizatsii temperatury v inkubatsionnoy kamere / A.A. Varenov, V.P. Zentsov, N.A. Malev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki. – 2018. – T. 20, No. 9-10. – S. 101-108.

12. Frolov S.V. Postroenie imitatsionnoy modeli neonatalnogo inkubatora s neyrokontrollerom / S.V. Frolov, A.A. Korobov, K.S. Savinova, A.Yu. Potlov // Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam: materialy konf. – 2024. – T. 1. – S. 573-577.



УДК 631.362.36:635.62

DOI: 10.53083/1996-4277-2025-253-11-71-76

Н.А. Круглых

N.A. Kruglykh

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

### MATHEMATICAL MODELING OF A PNEUMATIC SEPARATOR OPERATION

**Ключевые слова:** пневматический сепаратор, сепарация семян, математическая модель, дифференциальное уравнение, метод Рунге-Кутты, вакуумное присасывание, цилиндрическая рабочая поверхность, угол отрыва, фракционирование семян, оптимизация сепарации.

Представлена математическая модель процесса сепарации семян овощных и бахчевых культур в новом пневматическом сепараторе с цилиндрической рабочей поверхностью. Цель исследования – разработка модели, описывающей движение семени под действием совокупности сил: тяжести, трения, центробежной, сопротивления воздуха, аэродинамиче-

ской и силы вакуумного присасывания. На основе теоретической механики и аэродинамики составлено нелинейное дифференциальное уравнение 2-го порядка, описывающее угловое движение семени по внутренней поверхности вращающегося барабана. Для численного решения применён метод Рунге-Кутты 4-го порядка с использованием программных средств Python (Matplotlib) и Mathcad. В качестве начальных условий приняты нулевые значения угла и угловой скорости. При заданных параметрах (масса семени 0,0003 кг, разрежение 280 Па, скорость вращения 0,16 м/с, коэффициент трения 0,61) модель предсказывает устойчивый угол отрыва семени – 23° от верхней точки барабана. Геометрический

анализ показал, что для попадания семени в приемный лоток допустим максимальный угол отрыва  $57^{\circ}9'$ , что обеспечивает достаточный технологический запас. Установлено, что ключевым регулируемым параметром сепаратора является разрежение в воздушных камерах, определяющее точность фракционирования. Предложенная модель позволяет не только прогнозировать поведение семян различных культур в процессе сепарации, но и оптимизировать конструктивные параметры сепаратора, а также его рабочие настройки для повышения качества сортировки и снижения потерь посевного материала. Результаты исследования имеют практическую ценность для разработки высокоэффективного оборудования в агропромышленном комплексе.

**Keywords:** *pneumatic separator, seed separation, mathematical model, differential equation, Runge-Kutta method, vacuum suction, cylindrical working surface, separation angle, seed fractionation, separation optimization.*

A mathematical model of the seed separation process for vegetable and melon crops in a novel pneumatic separator with a cylindrical working surface is discussed. The research goal is to develop a model describing seed motion under the combined action of gravi-

ty, friction, centrifugal force, air resistance, aerodynamic force, and vacuum suction force. Based on theoretical mechanics and aerodynamics, a second-order nonlinear differential equation was derived to describe the angular motion of a seed along the inner surface of a rotating drum. The equation was solved numerically using the fourth-order Runge-Kutta method implemented with Python (Matplotlib) and Mathcad software. The initial conditions were set to zero values for both angular position and angular velocity. Under the specified parameters (seed mass of 0.0003 kg, vacuum pressure of 280 Pa, drum rotation speed of 0.16 m/s, and friction coefficient of 0.61), the model predicts a stable seed separation angle of  $23^{\circ}$  from the drum top point. The geometric analysis showed that the maximum allowable separation angle for seeds to enter the charging chute was  $57^{\circ}9'$  that ensured a sufficient technological margin. It was found that the key adjustable parameter determining separation accuracy was the vacuum pressure in the air chambers. The developed model enables not only to predict seed behavior during separation but also optimize both the separator structural design and operational settings to improve grading quality and minimize seed loss. The results obtained are of practical value for the development of high-efficiency equipment intended for use in the agro-industrial sector.

**Круглых Никита Александрович**, учебный мастер, ФГБОУ ВО Луганский ГАУ, г. Луганск, Российская Федерация, e-mail: nikakom-1@mail.ru.

**Kruglykh Nikita Aleksandrovich**, Instructor, Lugansk Voroshilov State Agricultural University, Lugansk, Russian Federation, e-mail: nikakom-1@mail.ru.

## Введение

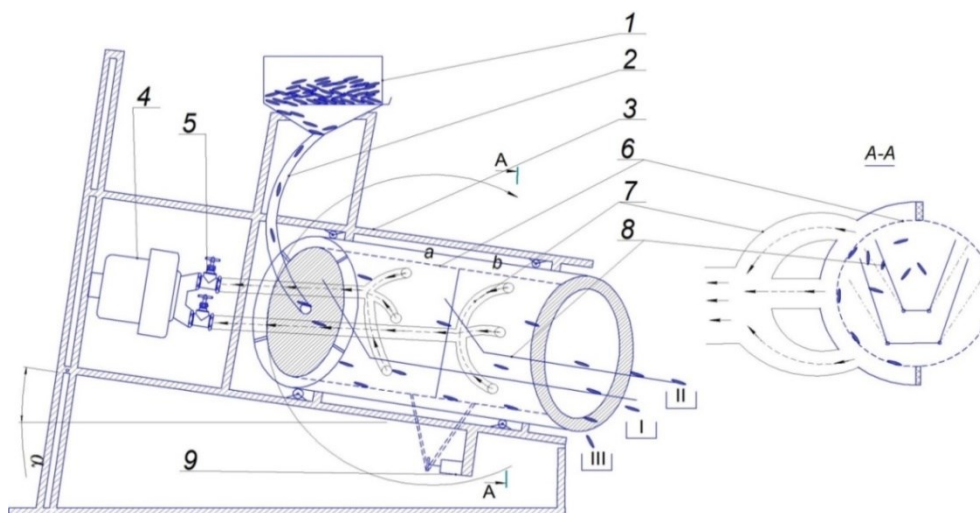
Конструкция новых пневматических сепараторов (рис. 1), предложенных специалистами ЛГАУ [1], предназначена для работы с семенами овощных и бахчевых культур. После отработки технологии на лабораторной модели был изготовлен производительный опытно-промышленный образец (ССБ-0,1) для внедрения в агропромышленный комплекс. Он используется для испытаний в фермерских хозяйствах и презентации на аграрных выставках. Важнейшим инженерным решением, повышающим эффективность сепарации, стало обеспечение равномерного воздействия воздушного потока и стабилизация положения семян на цилиндрической поверхности рабочей камеры [2].

Принцип действия сепаратора основан на использовании разности разрежений в двух воздушных камерах [3], расположенных последовательно вдоль наклонной барабанной поверхно-

сти. Проходя через рабочую поверхность, семенной материал подвергается пневматическому воздействию. Частицы легкой и средней фракций, обладающие меньшей массой, разделяются на фракции и под действием разрежения транспортируются в соответствующие приемные лотки. Тяжелая фракция проходит через всю поверхность барабана, не присосавшись.

**Цель** исследования – разработать математическую модель процесса работы нового пневматического сепаратора. Поставленная цель включает в себя следующие **задачи**:

- представить схему сил, действующих на семя в процессе при его движении во внутренней цилиндрической рабочей поверхности;
- математически описать процесс движения семени, составив дифференциальное уравнение, позволяющее рассчитать условия попадания семени в приемный лоток сепаратора.



**Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема нового пневматического сепаратора:**  
 1 – бункер для семян, 2 – гофра для подачи семян, 3 – рама, 4 – вакуумный вентилятор,  
 5 – регулировочный клапан, 6 – рабочая поверхность, 7 – воздушная гофра, 8 – приемный лоток,  
 9 – привод; а – зона первой воздушной камеры, б – зона второй воздушной камеры;  
 I – фуражная фракция, II – товарная фракция, III – посевная фракция

### Методы исследования

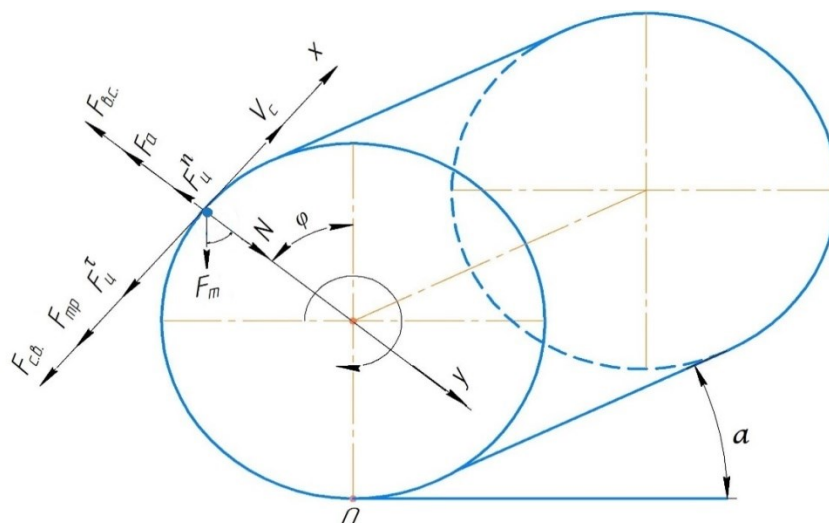
Теоретические исследования проводились с использованием теоретической механики, аэродинамики и других наук. Для решения дифференциального уравнения использовался метод Рунге-Кутты 4-го порядка [4] и программный пакет Matplotlib в Python [5] и Mathcad [6].

### Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим движение семени внутри цилиндрического барабана пневматического сепаратора. Силы, которые действуют на семя от

начала его пути до момента отрыва, показаны на рисунке 2.

На материальное тело, находящееся во вращающемся цилиндре в процессе сортировки, действуют такие силы:  $F_m$  – сила тяжести, Н;  $F_{ц}^{(τ)}$  и  $F_{ц}^n$  – центробежная сила инерции, которая делится на тангенциальную и нормальную;  $F_{тр}$  – сила трения;  $F_{в.с.}$  – сила вакуумного присасывания;  $F_{с.в.}$  – сила сопротивления воздуха;  $F_a$  – аэродинамическая сила.



**Рис. 2. Схема сил, действующих на семя при ее движении во внутренней цилиндрической сепарирующей поверхности разрабатываемого пневматического сепаратора**

Ранее процесс движения частицы внутри вращающегося цилиндра исследовал ученый Петр Мефодиевич Василенко, предложив уравнение [7, с. 219]. Опираясь на его опыт, необходимо провести теоретические исследования и получить аналитические зависимости.

Необходимо получить углы отрыва семени от рабочей поверхности с учетом соотношений сил, направленных на его удержание и отрыв от поверхности. Все семена оказывают нормальное давление  $N$  на сепарирующую поверхность. Спроектируем рассмотренные силы на касательную к внутренней рабочей поверхности и составим дифференциальное уравнение движения семени в проекциях на оси движимой системы координат  $XOY$ :

$$m\ddot{a} = \sum \vec{F}, \text{ или на координате оси } XOY; \\ \begin{cases} m\ddot{x} = -F_{c.в.} - F_{ц}^{(\tau)} - F_{тр} - F_m \cdot \sin \phi \cos \alpha \\ m\ddot{y} = -F_{в.с.} - F_a - F_{ц} + F_m \cos \phi \cos \alpha + N' \end{cases} \quad (1)$$

т.к. семя не движется по оси  $y$ , то  $\ddot{y} = 0$ . Тогда из второго уравнения выразим:

$$N = F_{в.с.} + F_a + F_{ц} - F_m \cos \phi \cos \alpha. \quad (2)$$

Подставим в первое и заменим  $\ddot{x} = r\ddot{\phi}$ , где  $\ddot{\phi} = \dot{\omega} = \varepsilon$  – угловое ускорение.

Так как движение равномерное:

$$F_{ц}^{(\tau)} = m \frac{dV_c}{dt} = ma_c = 0; \quad (3)$$

$$mr\ddot{\phi} = -mk_n V_c^2 - 0 - f \cdot N = mg \sin \phi \cos \alpha. \quad (4)$$

Подставим  $N$ :

$$mr\ddot{\phi} = -mk_n V_c^2 - f(\Delta p \cdot s + mk_n V_b^2 + m \frac{V_c^2}{r} - mg \cos \phi \cos \alpha) - mg \sin \phi \cos \alpha; \quad (5)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{mr} (-mk_n V_c^2 - f\Delta p \cdot s - mk_n V_b^2 - fm \frac{V_c^2}{r} + fmg \cos \phi \cos \alpha - mg \sin \phi \cos \alpha). \quad (6)$$

Учитываем, что  $\frac{V_c^2}{r} = \dot{\phi}^2$  в формуле центростремительная сила, получим:

$$\ddot{\phi} + f\dot{\phi}^2 = -\frac{k_n V_c^2}{r} - \frac{f\Delta p \cdot s}{mr} - \frac{k_n V_b^2}{r} + \frac{fg \cos \phi \cos \alpha}{r} - \frac{g \sin \phi \cos \alpha}{r}. \quad (7)$$

$$\angle BAC = \arccos \frac{AC}{AB} = \arccos \frac{5,25}{6,26} = \arccos 0,84 = 32^\circ 51'; \quad (11)$$

$$\angle BAD = \angle CAD - \angle BAC = 90^\circ - 32^\circ 51' = 57^\circ 9'. \quad (12)$$

Сделаем замену:

$$B = -\frac{k_n V_c^2}{r} - \frac{f\Delta p \cdot s}{mr} - \frac{k_n V_b^2}{r}. \quad (8)$$

Тогда получим дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью:

$$\ddot{\phi} + f\dot{\phi}^2 = \frac{fg \cos \phi \cos \alpha}{r} - \frac{g \sin \phi \cos \alpha}{r} + B. \quad (9)$$

Получили нелинейное обыкновенное ДУ 2-го порядка. Зная начальные условия  $\phi(0) = 0, \dot{\phi}(0) = 0$ , имеем задачу Коши.

Для решения применим одношаговый метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

С целью проверки математической модели подставим параметры сепарации из поисковых экспериментов, где диаметр отверстий будет равен 0,4 см, разрежение в них будет равно 280 Па. Линейная скорость вращения барабана будет 0,16 м/с, семя возьмем массой 0,0003 кг, угол наклона составит  $4^\circ$ . Радиус барабана составит 0,0625 м, изготовленного из алюминия с крупнозернистой абразивной обработкой, что дает коэффициент трения 0,61. Коэффициент парусности семян тыквы составляет 0,195.

Так, решение ОДУ:

$$\dot{y} = 0,61\dot{y}^2 = 95,648 \cos y - 156,8 \sin y - 187,539104. \quad (10)$$

Решение, полученное в математических пакетах Python с использованием классического метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности, представляет собой затухающие колебания. Начиная с  $x = 50$ , решение сходится к значению  $y = 0,401$  (рис. 3) приблизительно, что соответствует углу  $23^\circ$  от верхней точки барабана.

Расстояние приемного лотка от стенки барабана регулируемое, зная ее и диаметр барабана сепаратора (рис. 4), путем элементарных геометрических вычислений узнаем минимальный угол отрыва семени, при котором оно попадает в приемный лоток.

Зная, что размеры, представленные на рисунке 6:  $AC = 5,25$  см,  $AB = 9,25$  см,  $CAD = 90^\circ$ , найдем максимально допустимый угол отрыва от верхней точки барабана, при котором семя попадет в приемный лоток:





Рис. 3. График, моделирующий процесс, описанный уравнением

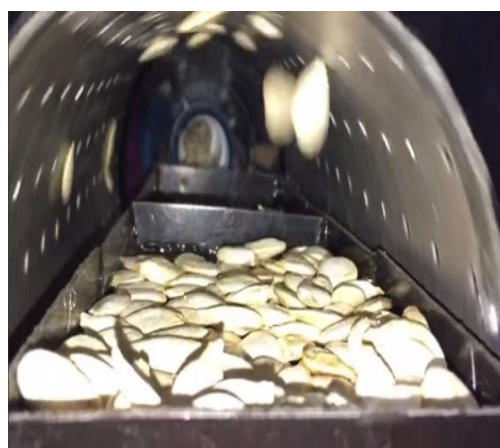
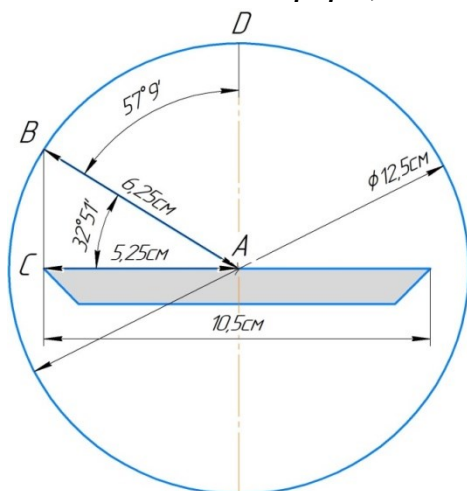


Рис. 4. Условия попадания семени в приемный лоток

Путем геометрических вычислений мы выяснили, что нам необходимо задать такие условия воздействия на семя, при которых максимальный угол отрыва от верхней точки цилиндра будет составлять  $57^{\circ}9'$ , для попадания семени в приемный лоток. Результат решения уравнения соответствует данному требованию. Основным влияющим фактором на угол отрыва семени является разрежение в отверстиях рабочей поверхности.

С учетом изначально обозначенных допущений в математической модели, для того чтобы минимизировать вероятность преждевременного отрыва семени, необходимо обеспечение условий отрыва семени с запасом от начального угла условия попадания в лоток, при этом не допуская избыточного разрежения для того, чтобы в лоток не попадали более тяжелые семена. При этом приемные лотки должны быть регулируемы.

### Выводы

1. Представлена схема сил, действующих на семя по время движения в цилиндрической сепарирующей поверхности нового пневматического сепаратора.
2. На основе представленных сил, действующих на семя, составлено дифференциальное уравнение движения семени, которое позволило вычислить угол отрыва семени. Подставив в уравнение параметры сепарации из поисковых экспериментов, был получен угол отрыва  $23^{\circ}$  от верхней точки цилиндра, что соответствует условию попадания семени в приемный лоток сепаратора.
3. Наибольшее влияние на угол отрыва семени оказывает сила вакуумного присасывания, основным параметром при настройке сепаратора является разрежение в воздушных камерах.

**Библиографический список**

1. Патент RU 2822527 C1, МПК B07B 4/00. Сепаратор семян овощных и бахчевых культур / Круглых Н. А., Ильченко А. А., Вольвак С. Ф. [и др.]. – № заявки 2024104114, заявл. 16.02.2024; опубл. 08.07.2024. – EDN BCRSNC. – Текст: непосредственный.
2. Ильченко, А. А. Перспективы разработок аэродинамических сепараторов для семян, имеющих плоскую форму поверхности / А. А. Ильченко, Н. А. Круглых, Н. Ю. Гоженко. – Текст: непосредственный // Профессия инженер: сборник материалов XI Всероссийской молодежной научно-практической конференции, г. Орел, 14 апреля 2023 г. / под общей редакцией А.Л. Севостьянова. Орел: Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, 2023. С. 116-121. – EDN HQNH CZ.
3. Круглых, Н. А. Разработка новой камеры разрежения для пневматического сепаратора семян / Н. А. Круглых. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-3-40-46. – Текст: непосредственный // Агроинженерия. – 2025. – Т. 27, № 3. – С. 40-46. – EDN POSLFB.
4. Лобашевская, В. А. Разработка алгоритма метода Рунге-Кутты четвертого порядка для решения систем дифференциальных уравнений на примере системы Лоренца / В. А. Лобашевская. – Текст: непосредственный // Молодой ученый. – 2021. – № 27 (369). – С. 24-27. – EDN XEQZIW.
5. Matthes E. Python Crash Course: A Hands-On, Project-Based Introduction to Programming. 2nd ed. - San Francisco: No Starch Press, 2015. - 544 p. - DOI: 10.5555/2935519.
6. Дружинина, Т. В. Технология работы в среде Mathcad 15 и Mathcad Prime: учебное пособие / Т. В. Дружинина. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2025. – 239 с. – ISBN 978-5-7782-5351-3. – EDN IFZROY. – Текст: непосредственный.
7. Василенко, П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин / П. М. Василенко; под

редакцией академика М. И. Медведева. – Киев: Изд-во Укр. акад. с.-х. наук, 1960. – 283 с.: черт.; 23 см. – Текст: непосредственный.

**References**

1. Separator semyan ovoshchnykh i bakhchevykh kultur: Patent RU 2822527 C1, MPK B07B 4/00 / N.A. Kruglykh, A.A. Ilchenko, S.F. Volvak i dr. No. zayavki 2024104114, zayavl. 16.02.2024; opubl. 08.07.2024.
2. Ilchenko A.A., Kruglykh N.A., Gozhenko N.Yu. Perspektivy razrabotok aerodinamicheskikh separatorov dlya semyan, imeyushchikh ploskuyu formu poverkhnosti // Professiya inzhener: Sbornik statey po materialam XI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, g. Orel, 14 aprelya 2023 g. / pod obshch. red. A.L. Sevostyanova. Orel: Orlovskiy GAU imeni N.V. Parakhina, 2023. S. 116-121.
3. Kruglykh, N. A. Razrabotka novoy kamery razrezheniya dlya pnevmaticheskogo separatora semyan / N. A. Kruglykh // Agroinzheneriya. – 2025. – Т. 27, No. 3. – S. 40-46. – DOI 10.26897/2687-1149-2025-3-40-46.
4. Lobashevskaya, V. A. Razrabotka algoritma metoda Runge-Kutta chetvertogo poryadka dlya resheniya sistem differentsial'nykh uravneniy na primere sistemy Lorentsa / V. A. Lobashevskaya // Molodoy uchenyy. – 2021. – No. 27 (369). – S. 24-27.
5. Matthes E. Python Crash Course: A Hands-On, Project-Based Introduction to Programming. 2nd ed. - San Francisco: No Starch Press, 2015. - 544 p. - DOI: 10.5555/2935519.
6. Druzhinina, T. V. Tekhnologiya raboty v srede Mathcad 15 i Mathcad Prime: uchebnoe posobie / T. V. Druzhinina. – Novosibirsk: NGTU, 2025. – 239 s.
7. Vasilenko, P. M. Teoriya dvizheniya chastitsy po sherokhovatym poverkhnostyam selskokhozyaystvennykh mashin / pod red. akad. M. I. Medvedeva. – Kiev: Izd-vo Ukr. akad. s.-kh. nauk, 1960. – 283 s.: chert; 23 sm.

