

УДК 621.9.06

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С НАКЛОННЫМ ДИСКом И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМИ КАРМАНАМИ ДЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК С ФЛАНЦЕМ

© 2025 Е.В. Пантюхина², А.Л. Бахно², С.А. Васин², А.А. Маликов²¹ ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», г. Тула, Россия¹ Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Статья поступила в редакцию 15.08.2025

В статье приводятся математические выражения для описания вероятности захвата стержневых заготовок с фланцем и производительности механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств с тангенциальными карманами. Рассматриваются параметры заготовок и загрузочно-ориентирующего устройства с тангенциальными карманами, которые влияют на вероятность захвата и производительность. Определены оказывающие наибольшее влияние на вероятность захвата и производительность параметры стержневых заготовок с фланцем и механического дискового бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с тангенциальными карманами. Представлены графики зависимостей вероятности захвата и производительности от геометрических параметров заготовок и конструктивных и кинематических параметров устройства с учетом коэффициентов трения между ними. Полученные зависимости и их визуализация позволяют оценить значения и степень влияния указанных параметров на вероятность захвата и производительность.

Ключевые слова: бункерное загрузочно-ориентирующее устройство с тангенциальными карманами, вероятность захвата, ориентирование заготовок с фланцем, производительность загрузки.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-171-177

EDN: HJLTWZ

ВВЕДЕНИЕ

Для автоматической загрузки цилиндрических и сложной формы ступенчатых заготовок было предложено регулируемое механическое дисковое бункерное загрузочно-ориентирующее устройство (БЗУ) с наклонным диском и тангенциальными карманами и разработаны конструктивные ограничения на органы захвата и ориентирования заготовок в нем [1, 2]. На ранних стадиях проектирования БЗУ необходимо разрабатывать математические модели вероятности захвата и производительности, что позволит оценить производительность устройства и принять меры по ее увеличению и выбрать параметры БЗУ, на которых достигаются требуемые значения производительности [3-5].

В основе построения математических моделей вероятности захвата заготовок тел вращения в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах (БЗУ) лежит представленная в работах [6, 7] концепция, в которой заложены основы теории вероятностей, что позволяет описать принципы захвата единичной заготовки из общей массы. Основываясь на данной концепции для описания влияния на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения между ними, была разработана математическая модель вероятности захвата стержневых ступенчатых цилиндрических заготовок в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами [8, 9].

В данной статье предлагается разработанная математическая модель вероятности захвата и производительности для стержневых заготовок с фланцем (рис. 1) в механическом дисковом БЗУ с тангенциальными карманами.

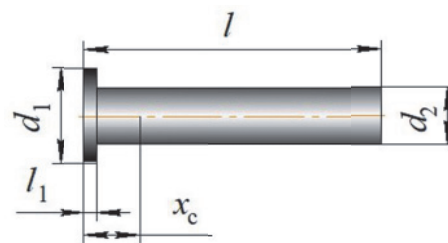


Рис. 1. Стержневая заготовка с фланцем и ее основные параметры

Пантюхина Елена Викторовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленная автоматика и робототехника». E-mail: e.v.pant@mail.ru

Бахно Александр Львович, кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора.

E-mail: Bahno.al@tulatoz.ru

Васин Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор-консультант кафедры «Технология машиностроения». E-mail: vasin_sa53@mail.ru

Маликов Андрей Андреевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения». E-mail: tppizi@yandex.ru

Математическая модель БЗУ с тангенциальными карманами для заготовки с фланцем будет построена на основе представленной в работе [10] концепции.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАХВАТА

Математическая модель вероятности захвата представляет собой произведение вероятностей

$$\eta = p_i p_c \left(1 - \frac{v^4}{v_{\text{пред}}^4} \right), \quad (1)$$

где p_i , p_c – вероятности, характеризующие соответственно благоприятное положение заготовки для ее захвата и отсутствие помех от сцепляемости заготовок; $v_{\text{пред}}$ – предельное значение окружной скорости v , при которой заготовка в карман не успеет запасть [10].

Вероятности p_i и p_c определяются по полученным выражениям:

$$p_i = 1 - \left[1 - \left[1 - \frac{2p_6 + 0,5 \left(1 - \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + 0,25d_1^4}} \right) + 0,5 \left(1 - \frac{l - x_c}{\sqrt{(l - x_c)^2 + 0,25d_2^4}} \right)}{2\pi} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\pi - \arccos \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + 0,25d_1^4}} - \arccos \frac{l - x_c}{\sqrt{(l - x_c)^2 + 0,25d_2^4}} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \arccos \frac{x_c - l_1}{\sqrt{(x_c - l_1)^2 + 0,25d_1^4}} + \arccos \frac{x_c - l_1}{\sqrt{(x_c - l_1)^2 + 0,25d_2^4}} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_d} \right) \right] \right]^3 \times \\ \times \left[1 - \frac{p_6}{\pi} \left(\arcsin \frac{d_1 + \Delta}{\sqrt{0,25(d_1 + d_2)^2 + l^2}} - \arccos \frac{l}{\sqrt{0,25(d_1 + d_2)^2 + l^2}} \right) \right]^{\frac{\pi R \phi_{\text{захв}}}{180l}}, \\ p_6 = 1 - 0,5 \left(1 - \frac{x_c}{\sqrt{x_c^2 + 0,25d_1^4}} \right) - 0,5 \left(1 - \frac{l - x_c}{\sqrt{(l - x_c)^2 + 0,25d_2^4}} \right) - \\ - \left[1 - \cos \left(\arccos \frac{x_c - l_1}{\sqrt{(x_c - l_1)^2 + 0,25d_1^4}} - \arccos \frac{x_c - l_1}{\sqrt{(x_c - l_1)^2 + 0,25d_2^4}} \right) \right], \\ p_c = 1 - \frac{\arctan(\mu_0)}{\frac{25\sqrt{2}\pi}{2} [d_1^2 + 2d_1l_1 + 2d_2(l - l_1)]} \cdot \left[\sqrt{2} \cdot 3d_1^2 + 2d_1^2 + \right. \\ \left. + 10d_1l_1 + 10d_2(l - l_1) \right],$$

где μ_0 – коэффициент трения между поверхностями заготовок; α_d – угол наклона диска БЗУ; R – радиус вращающегося диска БЗУ по оси расположения тангенциальных карманов; $\phi_{\text{захв}}$ – зона расположения карманов, в которой может разместиться k заготовок.

Оценим влияние геометрических параметров заготовок на вероятность захвата η на основе вероятностей p_i и p_c .

На рис. 2 представлены графики зависимостей вероятности p_i для заготовок с диаметрами $d_2 = 0,5d_1$ и $d_2 = 0,6d_1$ при $d_1 = 0,01$ м в зависимости от параметра $a = l/d_1$, угла наклона вращающегося диска $\alpha_d = 45^\circ$, его радиуса 0,25 м, при зазорах $\Delta = 0,1d_1$, $\Delta = 0,2d_1$ и $\Delta = 0,3d_1$, а также коэффициентах трения $\mu = 0,3$ и $\mu = 0,4$.

На вероятность p_i в диапазоне a от 3 до 4,5 решающую роль оказывает величина зазора Δ и коэффициент трения μ , но при дальнейшем увеличении a влияние указанных параметров не настолько существенно.

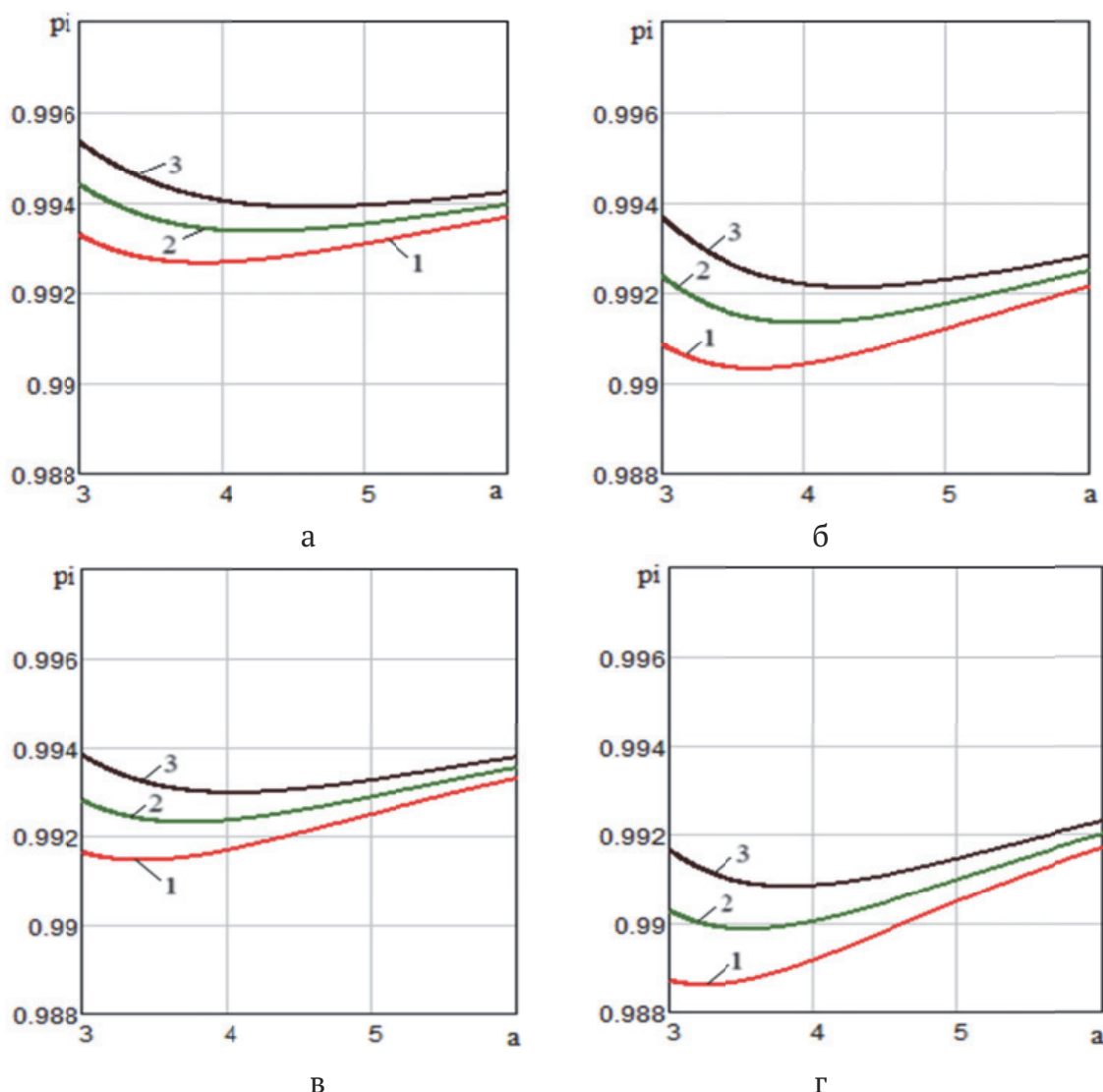


Рис. 2. Закономерности изменения вероятности p_i для заготовок с $d_2 = 0,5d_1$ (а, в) и $d_2 = 0,6d_1$ (б, г) при коэффициентах трения 0,3 (а, б) и 0,4 (в, г) и зазорах $\Delta = 0,1d_1$ (1), $\Delta = 0,2d_1$ (2) и $\Delta = 0,3d_1$ (3)

Графики зависимостей вероятности p_c при описании вероятности захвата η для заготовок в зависимости от параметра $a = l/d_1$ в диапазоне от 3 до 6 при $\mu_0 = 0,2$, $\mu_0 = 0,3$ и $\mu_0 = 0,4$, а также результаты ее теоретического исследования представлены в работе [8]. В работе также представлены закономерности изменения предельной скорости $v_{пред}$ и вероятности p_u для заготовок при $d_1 = 0,1$ м в зависимости от параметра $a = l/d_1$ в диапазоне от 3 до 6 при зазорах $\Delta_k = 0,1l$, $\Delta_k = 0,15l$ и $\Delta_k = 0,2l$.

На рис. 3 представлены сводные графики вероятности захвата заготовок с фланцем при $d_1 = 0,15$ м, параметра $a = 3$, $a = 4$, $a = 5$ и $a = 6$ при зазоре $\Delta_k = 0,15l$ в зависимости от фактической окружной скорости U тангенциальных карманов.

Для заготовок максимальные значения вероятности захвата находятся в диапазоне от 0,96 до 0,97. Анализ показал, что на все вероятности оказывает влияние соотношение длины к наибольшему диаметру заготовки, а также на вероятность нахождения заготовок в благоприятном для захвата положении зазор по ширине кармана и коэффициент трения между заготовками и БЗУ; на вероятность отсутствия помех для захвата заготовок от сцепляемости друг с другом коэффициент трения между заготовками; на вероятность отсутствия помех для захвата заготовок от окружной скорости тангенциальных карманов влияет зазор по длине кармана и диаметр меньшего торца. Комплексный анализ влияния всех параметров разработанной математической модели показал, что наибольшее влияние на вероятность захвата цилиндрических ступенчатых заготовок оказывает соотношение длины и большего диаметра заготовки, зазор между заготовкой и карманом в тангенциальном направлении и окружная скорость тангенциальных карманов.

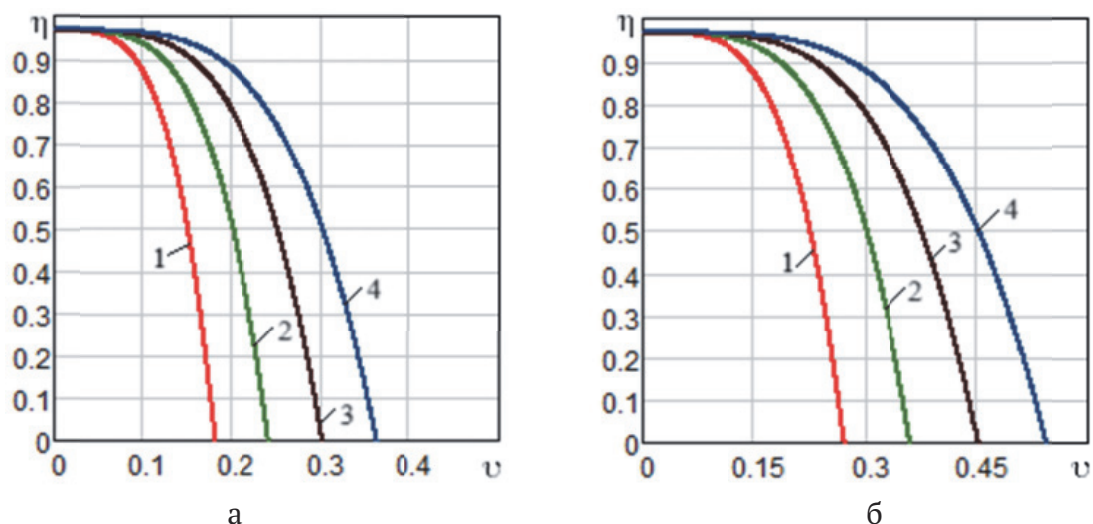


Рис. 3. Закономерности изменения вероятности захвата η для заготовок с диаметрами $d_2 = 0,5d_1$ (а) и $d_2 = 0,6d_1$ (б) при $a = 3$ (1), $a = 4$ (2), $a = 5$ (3) и $a = 6$ (4)

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Математическая модель производительности может быть представлена в виде:

$$\Pi = \frac{60v}{t} \left[p_i p_c \left(1 - \frac{v^4}{v_{\text{пред}}^4} \right) \right].$$

Примем не влияющие существенно на производительность БЗУ параметры постоянными: $\Delta = 0,1d_1$; $R=0,25$ м; $\mu_0 = 0,3$; $\mu = 0,4$, а также параметры заготовок $d_1 = 0,01$ м; $l_1 = 0,9l$; $d_0 = 0,9d_1$. Результаты влияния на производительность БЗУ геометрических параметров заготовок, а именно соотношений $a = l/d_1$ (при $c = d_2/d_1 = 0,7$) и диаметров торцов $c = d_2/d_1$ (при $a = l/d_1 = 4$), а также окружной скорости v карманов БЗУ, при $\alpha_d = 45^\circ$ и $\Delta_k = 0,15l$ представлены на графиках рис. 4. Максимальные значения производительности БЗУ составляют 270..290 шт./мин, но для заготовок с соотношением параметра $a = 3$ они достигаются при гораздо меньших скоростях, чем для заготовок с $a = 4$ и $a = 5$. Чем больше значение соотношения диаметров торцов $c = d_2/d_1$, тем больше производительность БЗУ; максимальная производительность БЗУ в зависимости от соотношения c составляет от 250 до 350 шт./мин. Достижение максимальных значений производительности происходит на более низких окружных скоростях v заготовки при $c = 0,5$.

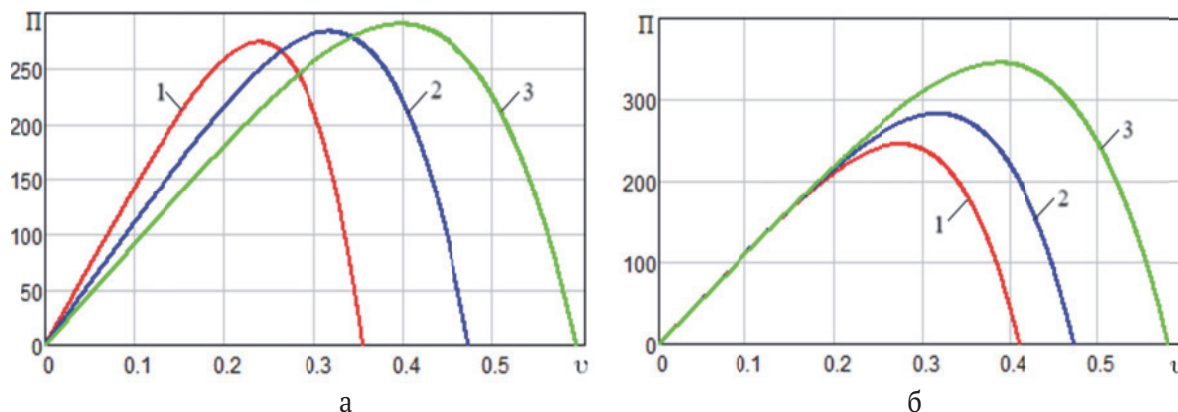


Рис. 4. Результаты влияния на производительность (шт./мин) БЗУ соотношений длины и большего диаметра $a = l/d_1$ (а) при $a = 3$ (1), $a = 4$ (2), $a = 5$ (3) и диаметров торцов $c = d_2/d_1$ (б) при $c = 0,5$ (1), $c = 0,6$ (2), $c = 0,7$ (3) в зависимости от окружной скорости v (м/с)

Результаты влияния на производительность зазоров Δ_K (при $\alpha_d = 45^\circ$) и угла наклона α_d (при $\Delta_K = 0,15l$), а также окружной скорости v карманов БЗУ, при $a = 4$ и $c = d_2/d_1 = 0,6$ представлены на графиках рис. 5.

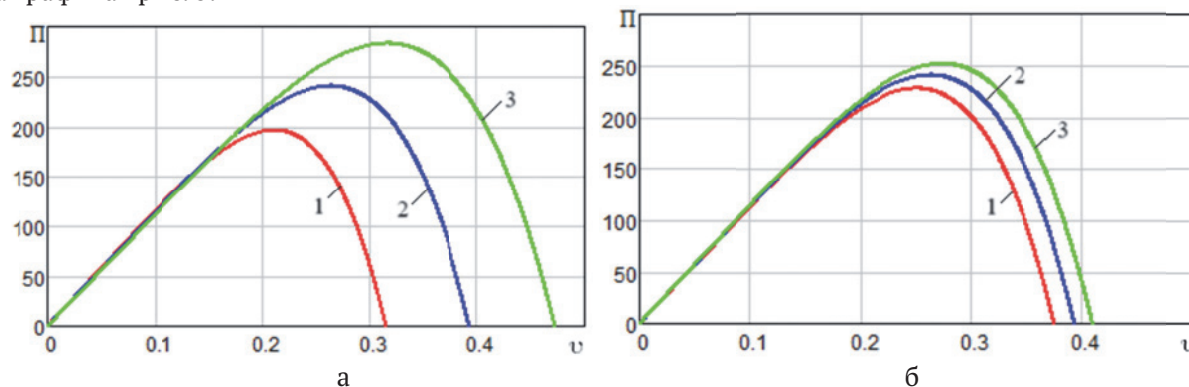


Рис. 5. Результаты влияния на производительность (шт./мин) зазоров Δ_K (а) при $\Delta_K = 0,1l$ (1), $\Delta_K = 0,125l$ (2), $\Delta_K = 0,15l$ (3) и углов α_d при $\alpha_d = 40^\circ$ (1), $\alpha_d = 45^\circ$ (2), $\alpha_d = 50^\circ$ (3) в зависимости от окружной скорости v (м/с)

Наибольшие значения производительности БЗУ при изменении параметра Δ_K достигаются при гораздо меньших скоростях для заготовок с $\Delta_K = 0,1l$, но значения производительности при этом параметре минимальны. При увеличении зазора Δ_K с $\Delta_K = 0,1l$ до $\Delta_K = 0,125l$ и с $\Delta_K = 0,125l$ до $\Delta_K = 0,15l$ производительность БЗУ увеличивается и составляет в зависимости от параметра Δ_K от 200 до 280 шт./мин. Угол наклона α_d не оказывает существенного влияния на производительность БЗУ, так как разница в ее значениях составляет около 5 %, составляя от 225 до 255 шт./мин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные математические модели производительности БЗУ с наклонным диском и тангенциальными карманами позволяют учесть влияние на производительность БЗУ геометрических параметров заготовок, их плотности и коэффициента трения между ними, угла наклона вращающегося диска, размеров, расположения и окружной скорости органов захвата, коэффициента трения между заготовками и вращающимся диском БЗУ. Значения максимальной производительности БЗУ в зависимости от его параметров и параметров загружаемых заготовок находятся в районе от 200 до 350 шт./мин. При этом их максимальные значения достигаются при наибольшей величине зазора Δ_K , значения которого ограничиваются возможностью захвата одним карманом нескольких заготовок. Теоретические исследования показали, что важную роль на захват заготовок оказывают все перечисленные параметры, а степень их влияния можно оценить с помощью представленных графиков. Указанные параметры также оказывают влияние на производительность БЗУ. С помощью разработанных математических моделей производительности было выявлено, что наиболее существенное влияние на производительность оказывает соотношение $a = l/d_1$ и $c = d_2/d_1$, а также зазор Δ_K по длине кармана и угол α_d наклона диска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантюхина, Е.В. Разработка конструкции механического бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для стержневых ступенчатых заготовок / Е.В. Пантюхина, С.А. Васин, А.А. Борисов, А.А. Маликов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 27. – № 3. – 2025. – С. 156–162.
2. Васин, С.А. Разработка ограничений на параметры органов захвата и ориентирования усовершенствованного универсального бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для стержневых ступенчатых заготовок / С.А. Васин, Е.В. Пантюхина, А.А. Борисов, А.А. Маликов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 27. – № 3. – 2025. – С. 163–170.
3. Лукин, С.А. Математическая модель вероятности захвата стержневых заготовок в форме колпачка в бункерном загрузочном устройстве с зубьями и регулируемым ориентатором / С.А. Лукин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 3–10.

4. Борисов, А.А. Математическая модель и теоретическое исследование производительности бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для сложных ступенчатых заготовок / А.А. Борисов, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 551–557.
5. Давыдова, Е.В. Математическая модель производительности вертикального бункерного загрузочного устройства для плоских асимметричных предметов обработки // Е.В. Давыдова, В.В. Прейс, А.В. Чурочкин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 3 (54). – С. 36–40.
6. Пантюхина, Е.В. Методология комплексного подхода для оценки производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств / Е.В. Пантюхина // В сборнике: Проблемы машиноведения. Материалы IV Международной научно-технической конференции. Научный редактор П.Д. Балакин. – 2020. – С. 380–388.
7. Васин, С.А. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / С.А. Васин, Е.В. Пантюхина // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2023. – № 3. – С. 64–88.
8. Борисов, А.А. Теоретическое исследование вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерном загрузочно-ориентирующем устройстве с наклонным диском и тангенциальными карманами / А.А. Борисов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 530–539.
9. Борисов, А.А. Математическая модель и теоретическое исследование производительности бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для сложных ступенчатых заготовок / А.А. Борисов, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 551–557.
10. Пантюхина, Е.В. Разработка методики проектирования универсального бункерного загрузочно-ориентирующего устройства с наклонным диском и тангенциальными карманами для стержневых ступенчатых заготовок / Е.В. Пантюхина, С.А. Васин, А.А. Маликов, А.А. Борисов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Т. 27. – № 3. – 2025. – С. 171–178.

CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODEL OF FEED RATE OF HOPPER FEEDING-ORIENTING DEVICE WITH INCLINED DISK AND TANGENTIAL POCKETS FOR CYLINDRICAL BILLETS WITH FLANGE

© 2025 E.V. Pantyukhina², A.L. Bakhno¹, S.A. Vasin², A.A. Malikov²

¹ PJSC “Imperial Tula Arms Plant”, Tula, Russia

² Tula State University, Tula, Russia

The article provides mathematical expressions to describe the probability of gripping rod blanks with a flange and the feed rate of mechanical disk hopper feeding-orienting devices with tangential pockets. Parameters of workpieces and feeding orienting device with tangential pockets, which affect the probability of gripping and feed rate, are considered. Parameters of rod blanks with flange and mechanical disk hopper feeding-orienting device with tangential pockets, which have the greatest influence on probability of gripping and feed rate, are determined. There are presented graphs of dependence of gripping probability and productivity on geometrical parameters of workpieces and structural and kinematic parameters of the device considering friction coefficients between them. The resulting dependencies and their visualization allow us to assess the values and the degree of influence of these parameters on the probability of capture and feed rate.

Key words: hopper feeding-orienting device with tangential pockets, probability of gripping, orientation of blanks with flange, feed rate.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-4-171-177

EDN: HJLTWZ

REFERENCES

1. Pantyuhina, E.V. Razrabotka konstrukcii mekhanicheskogo bunkernogo zagruzochno-orientiruyushchego ustrojstva s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami dlya sterzhnevyyh stupenchatyyh zagotovok/ E.V. Pantyuhina, S.A. Vasin, A.A. Borisov, A.A. Malikov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – Т. 27. – № 3. – 2025. – S. 156–162.
2. Vasin, S.A. Razrabotka ogranichenij na parametry organov zahvata i orientirovaniya usovershenstvovannogo universal'nogo bunkernogo zagruzochno-orientiruyushchego ustrojstva s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami dlya sterzhnevyyh stupenchatyyh zagotovok/ S.A. Vasin, E.V. Pantyuhina, A.A. Borisov, A.A. Malikov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – Т. 27. – № 3. – 2025. – S. 163–170.
3. Lukin, S.A. Matematicheskaya model' veroyatnosti zahvata sterzhnevyyh zagotovok v forme kolpachka v bunkernom zagruzochnom ustrojstve s zub'yami i reguliruемым orientatorom / S.A. Lukin // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – № 8. – pp. 3–10.

4. *Borisov, A.A. Matematicheskaya model' i teoreticheskoe issledovanie proizvoditel'nosti bunkernogo zagruzochno-orientiruyushchego ustrojstva s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami dlya slozhnykh stupenchatykh zagotovok / A.A. Borisov, S.A. Vasin, E.V. Pantyuhina // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2. – pp. 551–557.*
5. *Davydova, E.V. Matematicheskaya model' proizvoditel'nosti vertikal'nogo bunkernogo zagruzochnogo ustrojstva dlya ploskikh asimmetrichnykh predmetov obrabotki // E.V. Davydova, V.V. Prejs, A.V. Churochkin // Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya. – 2016. – № 3 (54). – pp. 36–40.*
6. *Pantyuhina, E.V. Metodologiya kompleksnogo podhoda dlya ocenki proizvoditel'nosti mekhanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochnykh ustrojstv / E.V. Pantyuhina // V sbornike: Problemy mashinovedeniya. Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Nauchnyj redaktor P.D. Balakin. – 2020. – pp. 380–388.*
7. *Vasin, S.A. Metodika opredeleniya veroyatnosti zahvata asimmetrichnykh detalej formy tel vrashcheniya v diskovykh bunkernykh zagruzochno-orientiruyushchih ustrojstvakh / S.A. Vasin, E.V. Pantyuhina // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie. – 2023. – № 3. – pp. 64–88.*
8. *Borisov, A.A. Teoreticheskoe issledovanie veroyatnosti zahvata sterzhnevyykh stupenchatykh zagotovok v bunkernom zagruzochno-orientiruyushchem ustrojstve s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami / A.A. Borisov // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2. – pp. 530–539.*
9. *Borisov, A.A. Matematicheskaya model' i teoreticheskoe issledovanie proizvoditel'nosti bunkernogo zagruzochno-orientiruyushchego ustrojstva s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami dlya slozhnykh stupenchatykh zagotovok / A.A. Borisov, S.A. Vasin, E.V. Pantyuhina // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2. – pp. 551–557.*
10. *Pantyuhina, E.V. Razrabotka metodiki proektirovaniya universal'nogo bunkernogo zagruzochno-orientiruyushchego ustrojstva s naklonnym diskom i tangencial'nymi karmanami dlya sterzhnevyykh stupenchatykh zagotovok/ E.V. Pantyuhina, S.A. Vasin, A.A. Malikov, A.A. Borisov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – T. 27. – № 3. – 2025. – pp. 171–178.*

Elena Pantyukhina, Doctor of Technical, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Automation and Robotics. E-mail: e.v.pant@mail.ru

Alexander Bakhno, Candidate of Technical Sciences, First Deputy General Director. E-mail: Bahno.al@tulatoz.ru

Sergey Vasin, Doctor of Technical, Professor, Professor-Consultant of the Department of Engineering Technology. E-mail: vasin_sa53@mail.ru

Andrey Malikov, Doctor of Technical, Professor, Head of the Department of Engineering Technology. E-mail: tppizi@yandex.ru