

УДК 621.9.06

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА С РАДИАЛЬНЫМИ КАРМАНАМИ И АКТИВНЫМ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ДЛЯ СТУПЕНЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ

© 2026 А.Л. Бахно¹, Е.В. Пантюхина², С.А. Васин²

¹ ПАО «Императорский Тульский оружейный завод», г. Тула, Россия

² Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Статья поступила в редакцию 09.04.2026

В статье рассматривается усовершенствованное универсальное механическое дисковое бункерное загрузочное устройство с радиальными карманами и активным ориентированием для асимметричных заготовок и изделий формы тел вращения. Представлены этапы построения математической модели вероятности захвата стержневых асимметричных ступенчатых изделий формы тел вращения со сферическим торцом и производительности усовершенствованного устройства, учитывающие влияние на вероятность захвата и производительность геометрических параметров изделий, конструктивных параметров устройства, окружной скорости органов захвата, коэффициентов трения между изделиями и контактирующими с ними в процессе захвата рабочими органами устройства, коэффициентов трения между изделиями при их взаимосцепляемости. Приведены результаты теоретического исследования вероятности захвата изделий и производительности усовершенствованного устройства при различных значениях зазора по шагу, соотношениям длины и диаметра изделий, значениях коэффициента трения между изделиями и устройством. Получены максимальные значения производительности устройства при различных параметрах.

Ключевые слова: бункерное загрузочное устройство, вероятность захвата изделий, ориентирование изделий, заготовки с асимметрией по торцам, производительность загрузки.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-76-84

EDN: UKQWMX

ВВЕДЕНИЕ

В различных отраслях промышленности в производственных процессах довольно часто встречаются изделия формы тел вращения, состоящие из двух и более частей, иметь явную и неявную асимметрию формы и смещения центра масс [1, 2]. В процессе массового производства продукции возникает потребность автоматического ориентирования таких изделий для их автоматизированной подачи с производительностью от 150 шт./мин и более в оборудование линий, в том числе роторного типа, от одной технологической операции к другой [3, 4]. При этом изделия после каждой операции могут менять форму, размеры, свойства образующих поверхностей и другие характеристики.

Основным устройством систем автоматической загрузки асимметричных изделий, которое обеспечивает ориентирование, является механическое дисковое бункерное загрузочное устройство (БЗУ) [5, 6]. Устройства данного типа отличаются вероятностным принципом работы при захвате одного изделия из общей массы, что существенно ограничивает их использование для изделий даже незначительно отличающихся друг от друга размерами и формой [7]. Так традиционные конструкции БЗУ были предназначены для конкретных изделий, имеющих явную асимметрию формы или смещение центра масс, что позволяло их использовать ограниченно [8, 9]. При появлении изделий с неявной асимметрией стали разрабатываться усовершенствованные конструкции БЗУ, которые обеспечивали автоматическую загрузку изделий и с явной, и с неявной асимметрией, но имели недостаточно высокую производительность, так как в большинстве случаев приходилось переходить с активных способов ориентирования на пассивные [10–13]. В последнее время стали широко разрабатываться усовершенствованные универсальные БЗУ для асимметричных изделий с явной асимметрией, которые за счет регулировки размеров органов захвата и ориентирования могут загружать различные по форме и размерам изделия в некоторых диапазонах их параметров [14].

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

E-mail: Bahno.al@tulatoz.ru

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

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

БУНКЕРНОЕ ЗАГРУЗОЧНОЕ УСТРОЙСТВО С РАДИАЛЬНЫМИ КАРМАНАМИ И АКТИВНЫМ ОРИЕНТИРОВАНИЕМ ДЛЯ АСИММЕТРИЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ФОРМЫ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

Для асимметричных заготовок и изделий формы тел вращения было разработано универсальное БЗУ с радиальными карманами и активным ориентированием [15, 16]. В усовершенствованном устройстве обеспечивается захват изделий радиальными пазами и карманами при участии кольцевого ориентатора (рис. 1).

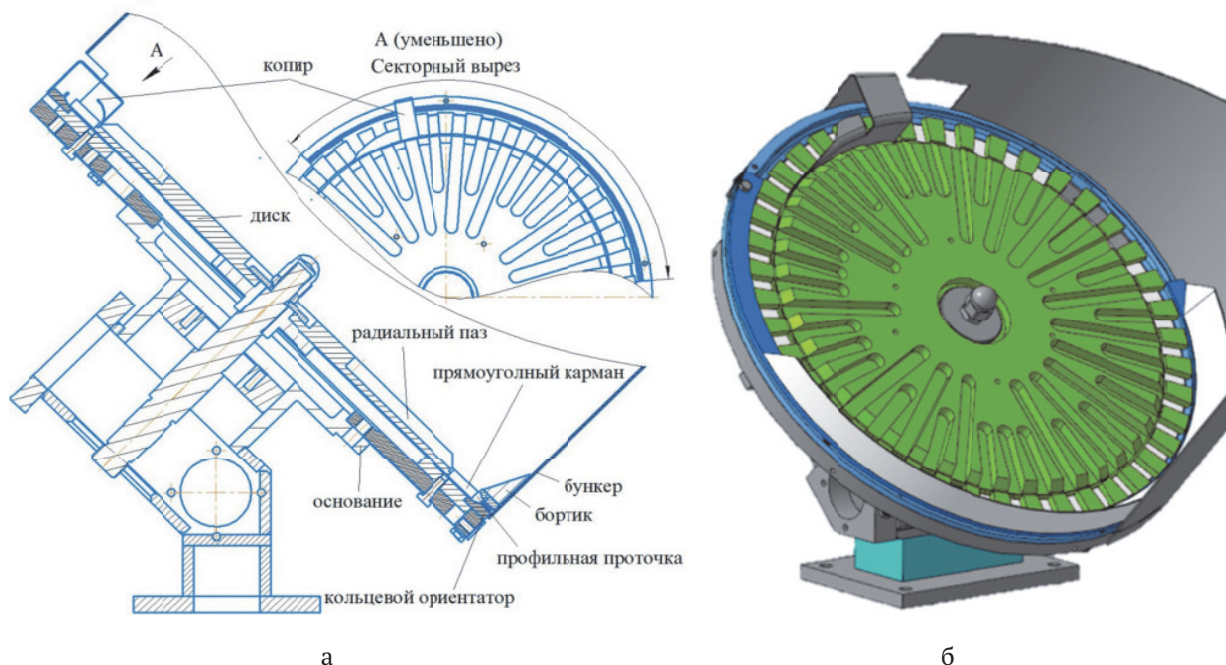


Рис. 1. Усовершенствованное устройство с радиальными карманами и регулируемым кольцевым ориентатором (а) и общий вид его 3D-модели (б) для асимметричных заготовок и изделий формы тел вращения

При вращении диска изделия, западая в радиальные пазы, движутся в сторону карманов. Если изделие движется асимметричным торцом вперед, то оно западает в профильную проточку кольцевого ориентатора и погружается в карман полностью; при движении изделия цилиндрическим торцом вперед, оно погружается в карман частично, так как упирается цилиндрическим торцом на край профильной проточки. Диск при вращении перемещает все изделия в верхнюю часть бункера, где установлен копир. Изделия, полностью запавшие в карманы, свободно проходят под копиром и перемещаются диском к разгрузочному окну для выдачи в приемный лоток. Изделия, не полностью запавшие в карманы, скользя по поверхности копира, вначале приподнимаются им в карманах, а затем опрокидываются и свободно западают в карманы, так как в зоне установки копира в верхнем кольце кольцевого ориентатора выполнен секторный вырез. В нижней части бункера выполнен бортик для предотвращения накапливания изделий на поверхности кольцевого ориентатора [17].

Устройство может быть использовано при загрузке изделий одного типоразмера, отличающегося диаметром цилиндрического торца на 20-30%, регулируется высота кольцевого паза. Регулировка усовершенствованного устройства под каждое изделие осуществляется путем изменения высоты кольцевого паза с помощью вращения регулировочных винтов и сжатия (разжатия) пружины.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СТУПЕНЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ

Построение математической модели производительности усовершенствованного устройства позволит определить возможности конструкции по загрузке изделий без необходимости разработки экспериментального макета устройства и проведения предварительных испытаний, существенно сократив тем самым временные и материальные затраты на данные процессы. Математическая модель производительности строится при последовательном выполнении четырех основных этапов: определение вероятности p_i нахождения изделий по направлению к карману в положении, благоприятном для захвата (этап 1), вероятности p_c того, что захвату не помешает взаимосцепляемость изделий (этап 2), вероятности p_v того, что захвату не помешает высокая окружная скорость

и органов захвата (этап 3), определение вероятности захвата η и производительности БЗУ ПБЗУ (этап 4):

$$\eta = p_i p_c p_v; \Pi_{\text{БЗУ}} = \eta \cdot \frac{60v}{t},$$

где $t = \delta + B = \delta + (d_1 + \Delta)$ – шаг органов захвата (радиальных карманов), м; B – ширина радиального кармана, м; δ – расстояние между радиальными карманами, м; d_1 – наибольший диаметр заготовки или изделия, м; Δ – зазор по шагу в радиальном кармане, м.

Построим математические модели вероятности захвата и производительности усовершенствованного БЗУ для асимметричных ступенчатых изделий формы тел вращения со сферическим торцом (рис. 2).

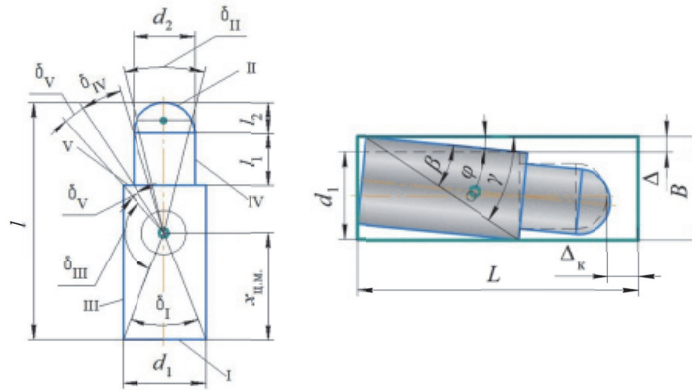


Рис. 2. Расчетные схемы для построения математических моделей вероятности захвата асимметричных ступенчатых заготовок и изделий формы тел вращения со сферическим торцом
На этапе 1 определяем:

- вероятность p_I того, что изделие окажется на поверхности диска после падения основанием цилиндрического торца (I):

$$\delta_I = 2 \arccos \frac{x_{\text{ц.м.}}}{\sqrt{(x_{\text{ц.м.}})^2 + 0,25d_1^2}}; p_I = \frac{1}{2} - \frac{x_{\text{ц.м.}}}{2\sqrt{(x_{\text{ц.м.}})^2 + 0,25d_1^2}};$$

- вероятность p_{II} того, что изделие окажется на поверхности диска после падения основанием асимметричного торца (II):

$$\delta_{II} = 2 \arccos \frac{l - l_2 + x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} - x_{\text{ц.м.}}}{\sqrt{(l - l_2 + x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} - x_{\text{ц.м.}})^2 + 0,25d_{\text{сф}}^2}}; p_{II} = \frac{1}{2} - \frac{l - l_2 + x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} - x_{\text{ц.м.}}}{2\sqrt{(l - l_2 + x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} - x_{\text{ц.м.}})^2 + 0,25d_{\text{сф}}^2}},$$

где все геометрические параметры изделий представлены на рис. 2;

$$x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} = \frac{3}{4} \frac{(2r - l_2)^2}{3r - l_2} + l_2 - r; d_{\text{сф}} = \sqrt{l_2 - x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} \left(\frac{d_1^2}{l_2} + 4x_{\text{ц.м.}}^{\text{сф}} \right)}; r = \frac{d_2^2 + 4l_2^2}{8l_2};$$

- вероятность p_V того, что изделие окажется на поверхности диска после падения ступенчатым основанием асимметричного торца (V):

$$\delta_V = 2 \arccos \frac{l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2}{\sqrt{(l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2)^2 + 0,25d_1^2}} - 2 \arccos \frac{l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2}{\sqrt{(l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2)^2 + 0,25d_2^2}};$$

$$p_V = \frac{l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2}{2\sqrt{(l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2)^2 + 0,25d_2^2}} - \frac{l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2}{2\sqrt{(l - x_{\text{ц.м.}} - l_1 - l_2)^2 + 0,25d_1^2}};$$

- вероятность $p_{i \max}$, которая характеризует возможность поворота изделия к карману требуемым торцом при расположении изделий на тех участках по периферии поверхности вращающегося диска в области карманов, где изделия располагаются в один слой:

$$p_{i \max} = \frac{p_{\text{бок}}}{\pi} (\delta_{II} + \delta_I + \delta_V - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_d}),$$

где $p_{\text{бок}} = 1 - (p_I + p_{II} + p_V)$ – вероятность нахождения на требуемой для захвата поверхности изделия [18]; μ – коэффициент трения между асимметричными изделиями и вращающимся диском БЗУ; α_d – угол наклона поверхности вращающегося диска к горизонту, град.;

- вероятность $p_{i \max}$, которая характеризует в математической модели вероятности p_i область, где над изделиями в процессе их захвата располагаются слои других изделий:

$$p_{i \min} = \frac{p_{\text{бок}}}{2\pi} \left(\arcsin \frac{d_1 + \Delta}{\sqrt{d_1^2 + l_{\text{ц}}^2}} - \arccos \frac{l_{\text{ц}}}{\sqrt{l_{\text{ц}}^2 + d_1^2}} \right);$$

где $l_{\text{ц}}$ – длина наибольшего по диаметру цилиндрического торца изделия, м.

- определение общего выражения для вероятности p_i :

$$p_i = 1 - (1 - p_{i \max})^3 (1 - p_{i \min})^{\frac{\pi R \phi_{\text{захв}}}{180 d_1}},$$

где $\phi_{\text{захв}}$ – зона захвата изделий (нижняя часть бункера БЗУ), град.; R – радиус вращающегося диска БЗУ, м.

На этапе 2 определяем:

- площади F_i всех образующих изделие поверхностей и их сумму $\sum F_i$;

- углы ξ_{xi}, ξ_{yi} возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей с i -ми соприкасающимися площадями F_1 и F_2 без отрыва друг от друга по плоскостям соответственно x и y ;

- вероятность p_c для описания влияния взаимосцепляемости изделий между собой в процессе их захвата с учетом коэффициент трения μ_0 между изделиями:

$$p_c = 1 - \frac{0,4 \cdot \arctan \mu_0}{\sqrt{2\pi} \cdot (F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV} + F_V)} \left[2\sqrt{2} \cdot (F_I + F_V) + 2F_I + 4F_{III} + 3F_V + F_{IV} \right].$$

На этапе 3 определяем:

- предельное по захвату значение окружной скорости $v_{\text{пред}}$, при котором вероятность захвата становится равной нулю, то есть $\eta = 0$, так как $p_v = 0$:

$$v_{\text{пред}} = \sqrt{d_1 g + 0,4g(h_p + 2\Delta) - 0,2g\sqrt{5d_1^2 - 4(\Delta - 2h_p)^2}},$$

где h_p – высота радиального паза, м;

- вероятность p_v отсутствия помех для захвата изделия от окружной скорости органов захвата:

$$p_v = 1 - \frac{v^4}{\left(d_1 g + 0,4g(h_p + 2\Delta) - 0,2g\sqrt{5d_1^2 - 4(\Delta - 2h_p)^2} \right)^2}.$$

На этапе 4 получаем:

- математическое выражение для описания вероятности захвата:

$$\eta = \left[\left[\left[1 - \frac{1 - (p_I + p_{II} + p_V)}{\pi} (\delta_{II} + \delta_I + \delta_V - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_d}) \right]^3 \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left[1 - \frac{1 - (p_I + p_{II})}{2\pi} \left(\arcsin \frac{d_1 + \Delta}{\sqrt{d_1^2 + (l - l_1)^2}} - \arccos \frac{l - l_1}{\sqrt{(l - l_1)^2 + d_1^2}} \right) \right] \right]^{\frac{\pi R \phi_{\text{захв}}}{180 d_1}} \right] \times \\ \times \left[1 - \frac{0,4 \cdot \arctan \mu_0}{\sqrt{2\pi} \cdot (F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV} + F_V)} \left[2\sqrt{2} \cdot (F_I + F_V) + 2F_I + 4F_{III} + 3F_V + F_{IV} \right] \right] \times \\ \times \left[1 - \frac{v^4}{\left(d_1 g + 0,4g(h_p + 2\Delta) - 0,2g\sqrt{5d_1^2 - 4(\Delta - 2h_p)^2} \right)^2} \right].$$

- математическое выражение для описания производительности усовершенствованного БЗУ:

$$\begin{aligned}
 \Pi_{\text{БЗУ}} = \frac{60v}{t} \cdot & \left[\left[1 - \frac{1 - (p_I + p_{II} + p_V)}{\pi} (\delta_{II} + \delta_I + \delta_V - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_D}) \right]^3 \times \right. \\
 & \left. \times \left[1 - \frac{1 - (p_I + p_{II})}{2\pi} \left(\arcsin \frac{d_1 + \Delta}{\sqrt{d_1^2 + (l - l_1)^2}} - \arccos \frac{l - l_1}{\sqrt{(l - l_1)^2 + d_1^2}} \right) \right] \right]^{\frac{\pi R \Phi_{\text{захв}}}{180 d_1}} \times \\
 & \times \left[1 - \frac{0,4 \cdot \arctan \mu_0}{\sqrt{2} \pi \cdot (F_I + F_{II} + F_{III} + F_{IV} + F_V)} \left[2\sqrt{2} \cdot (F_I + F_V) + 2F_I + 4F_{III} + 3F_V + F_{IV} \right] \right] \times \\
 & \times \left[1 - \frac{v^4}{\left(d_1 g + 0,4g(h_p + 2\Delta) - 0,2g\sqrt{5d_1^2 - 4(\Delta - 2h_p)^2} \right)^2} \right],
 \end{aligned}$$

Полученные выражения позволяют теоретически описать вероятность захвата и производительность усовершенствованного устройства для асимметричных ступенчатых изделий формы тел вращения со сферическим торцом во взаимосвязи с параметрами устройства и загружаемых изделий.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАХВАТА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СТУПЕНЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ СО СФЕРИЧЕСКИМ ТОРЦОМ

Для того чтобы оценить, на сколько произойдет увеличение производительности усовершенствованного устройства при загрузке ступенчатых изделий со сферическим торцом проведем теоретические исследования. Компьютерное моделирование производительности и вероятности захвата было выполнено в программе MathCad. Ниже представлены графики зависимостей вероятности захвата изделий, а также производительности усовершенствованного устройства от окружающей скорости его радиальных карманов (рис. 3).

При моделировании были взяты постоянными для изделий следующие параметры: радиус вращающегося диска БЗУ $R = 8l$ м, диаметр цилиндрического торца изделия $d_1 = 0,012$ м, диаметр асимметричного торца изделия $d_2 = 0,008$ м, глубина радиального паза на вращающемся диске $h_p = 0,5d_1$, длина части асимметричного торца в форме усеченного конуса $l_1 = 0,25l$ м, длина части асимметричного торца в форме сегмента сферы $l_2 = 0,125l$ м, угол наклона вращающегося диска $\alpha_D = 45^\circ$. Коэффициент трения изделий друг с другом $\mu_0 = 0,45$.

При построении графиков варьировали длиной изделия $l = 2,5d_1; l = 3,0d_1; l = 3,5d_1$ и зазором $\Delta = 0,1d_1; \Delta = 0,2d_1$. Варьирование коэффициентом трения движения изделия по диску осуществлялось по значениям $\mu = 0,3$ (1); $\mu = 0,4$ (2); $\mu = 0,5$ (3).

Значения максимальной производительности усовершенствованного устройства при различных параметрах приведены в таблице.

Таким образом, производительность по загрузке изделий с торцом, плавно переходящим сначала в усеченный конус, а потом в сегмент сферы, для усовершенствованного устройства может достигать в зависимости соотношения длины и диаметра изделия до 300...325 шт./мин при максимальной вероятности захвата 0,63...0,7.

Таблица. Значения максимальной производительности усовершенствованного устройства

Величина зазора	Коэффициент трения	Значение производительности, шт./мин		
		Соотношение длины изделия к диаметру		
		$l = 2,5d_1$	$l = 3d_1$	$l = 3,5d_1$
$\Delta = 0,1d_1$	0,3	300	276	256
	0,4	248	216	188
	0,5	174	131	93
$\Delta = 0,2d_1$	0,3	325	310	296
	0,4	283	260	241
	0,5	220	187	159

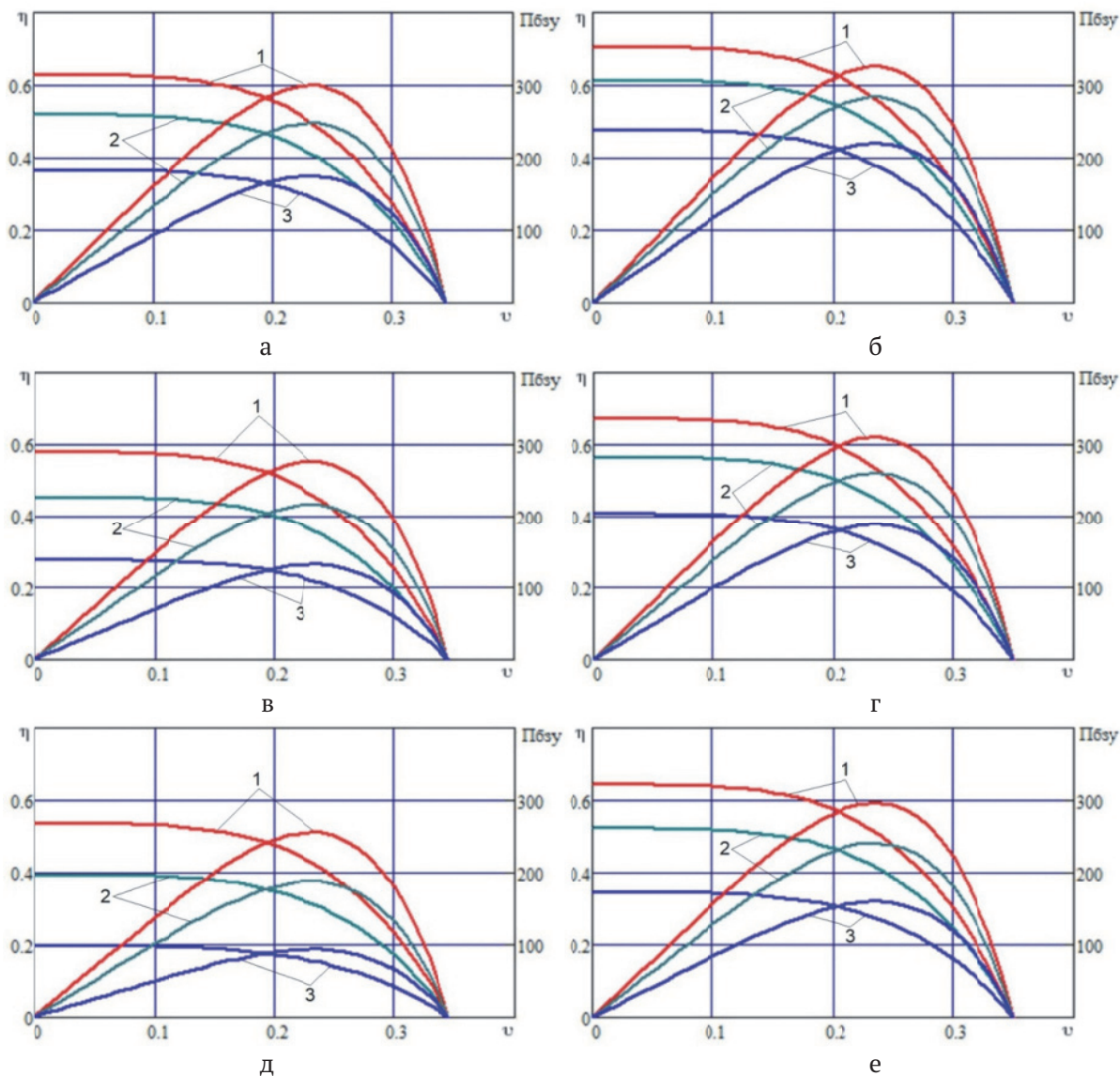


Рис. 3. Визуализация математических зависимостей вероятности захвата и производительности усовершенствованного устройства при зазорах $\Delta = 0,1d_1$ (а, в, д) и $\Delta = 0,2d_1$ (б, г, е), соотношениях $l = 2,5d_1$ (а, б); $l = 3d_1$ (в, г) и $l = 3,5d_1$ (д, е) и коэффициентах трения $\mu = 0,3$ (1); $\mu = 0,4$ (2); $\mu = 0,5$ (3)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные математические модели вероятности захвата стержневых асимметричных ступенчатых изделий формы тел вращения со сферическим торцом и производительности усовершенствованного устройства учитывают влияние на вероятность захвата и производительность геометрических параметров изделий, конструктивных параметров устройства, окружной скорости органов захвата, коэффициентов трения между изделиями и контактирующими с ними в процессе захвата рабочими органами устройства, коэффициентов трения между изделиями при их взаимосцепляемости. Результаты теоретического исследования вероятности захвата изделий и производительности усовершенствованного устройства при различных значениях зазора по шагу, соотношениях длины и диаметра изделий, значениях коэффициента трения между изделиями и рабочими органами устройства показали значительное повышение производительности по сравнению с ранее известным БЗУ с радиальными карманами и кольцевым ориентатором, в котором было реализовано пассивное ориентирование.

Теоретические исследования показали, что на значения вероятности захвата и производительности усовершенствованного устройства при захвате изделий радиальными карманами и их дальнейшем активном ориентировании с помощью копира оказывает влияние соотношение длины к наибольшему диаметру изделия, зазор по шагу кармана, а также коэффициент трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукин, С.А. Автоматическая загрузка штучных заготовок в патронном производстве / С.А. Лукин, С.А. Васин // Сб. тр. 60-й Научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием: сборник докладов в 2 ч. / под ред. д-ра техн. наук М.С. Воротилина. – Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. – С. 143–148.
2. Бахно, А.Л. Направления проектирования механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств для заготовок различных типоразмеров / А.Л. Бахно, И.В. Пузиков, Е.В. Пантюхина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 508–514.
3. Голубенко, В.В. Механические дисковые загрузочные устройства для стержневых заготовок с асимметрией торцов / В.В. Голубенко, Е.В. Давыдова, В.В. Прейс // Машиностроение и техносфера XXI века; сборник трудов XVIII Международной научно-технической конференции. – 2011. – С. 184–187.
4. Борисов, А.А. Автоматическое ориентирование штучных предметов в механических бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах / А.А. Борисов, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина // В сборнике: 60-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием. Сборник докладов. В 2-х частях: ч.2. – Тула, 2024. – С. 136–142.
5. Дьякова, Э.В. Обеспечение основных показателей качества бункерных загрузочных устройств при загрузке деталей с асимметрией по торцам / Э.В. Дьякова, Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: Материалы XVII Международной научно-технической конференции, Вологда, 08 декабря 2022 года / Ответственный редактор В.А. Раков. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2023. – С. 32–36.
6. Давыдова, Е.В. Механические бункерные загрузочные устройства в пищевой промышленности: под науч. ред. В.В. Прейса / Е.В. Давыдова, В.В. Прейс. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. – 168 с.
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. Усенко, Н.А. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в технологические машины-автоматы: учебное пособие / Н.А. Усенко, В.В. Прейс, Е.В. Давыдова, Е.С. Бочарова; Под научной редакцией В.В. Прейса. – Тула: Тульский государственный университет, 2013. – 312 с.
9. Прейс, В.Ф. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками / В.Ф. Прейс [и др.]; под ред. В.Ф. Прейса. – М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
10. Пантюхина, Е.В. Механические бункерные загрузочные устройства для элементов патронов стрелкового оружия с неявной асимметрией / Е.В. Пантюхина, В.В. Прейс // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: тр. XII общероссийской научно-практической конференции: в 3 т. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ». – Санкт-Петербург. – 2020. – С.79–85.
11. Давыдова, Е.В. Автоматическая загрузка стержневых предметов обработки с неявно выраженной асимметрией по торцам / Е.В. Давыдова, В.В. Прейс. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. – 112 с.
12. Пантюхина, Е.В. Проектирование механических дисковых бункерных загрузочных устройств для предметов обработки формы тел вращения с неявной асимметрией / Е.В. Пантюхина. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2024. – 228 с.
13. Пантюхина, Е.В. Научные основы проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для деталей с неявной асимметрией по торцам / Е.В. Пантюхина, В.В. Прейс // Современные технологии сборки: материалы VII Международного научно-технического семинара. – М., 2021. – С. 111–120.
14. Борисов, А.А. Универсальные конструкции механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств для асимметричных по торцам заготовок тел вращения / А.А. Борисов, Е.В. Пантюхина, С.А. Васин, А.С. Клентак // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26. – № 6(122). – С. 109–114.
15. Пузиков, И.В. Применение универсального бункерного загрузочного устройства с радиальными карманами и активным ориентированием для широкой номенклатуры асимметричных по торцам изделий / И.В. Пузиков // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сборник научных трудов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Тула, 10 октября 2025 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2025. – С. 72–77.
16. Пат. RU 220505 U1 Российская Федерация. МПК В23Q 7/02. Бункерное загрузочное устройство для цилиндрических заготовок с цилиндрической формой одного из торцов и конической формой другого / В.В. Прейс, Е.В. Пантюхина, И.В. Пузиков – № 2023108055; заявл. 30.03.2023; опубл. 18.09.2023. – Бюл. № 26.
17. Пузиков, И.В. Этапы проектирования дискового бункерного загрузочного устройства с радиальными карманами, копиром и регулируемым кольцевым ориентатором для многокомпонентных асимметричных изделий тел вращения / И.В. Пузиков, Е.В. Пантюхина, С.А. Васин [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3(99). – С. 222–230.
18. Пузиков, И.В. Разработка математических моделей вероятности захвата одно- и многокомпонентных асимметричных изделий в универсальном бункерном загрузочном устройстве с радиальными карманами и активным ориентированием / И. В. Пузиков, С.А. Васин, Е.В. Пантюхина, А.Л. Бахно // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2026. – Т. 28. – № 1. – С. 5–14.

**MATHEMATICAL MODEL AND THEORETICAL STUDY OF FEED RATE
OF HOPPER FEEDER WITH RADIAL POCKETS AND ACTIVE ORIENTATION
FOR STEPPED PRODUCTS WITH SPHERICAL END**

© 2026 A.L. Bakhno¹, E.V. Pantyukhina², S.A. Vasin²

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

² Tula State University, Tula, Russia

The article discusses an improved universal mechanical disk hopper feeder with radial pockets and active orientation for asymmetric workpieces and products of the shape of solids of revolution. Stages of construction of mathematical model of probability of gripping of rod asymmetric stepped products of shape of bodies of revolution with spherical end and feed rate of improved device are presented, taking into account influence on probability of gripping and productivity of geometric parameters of products, design parameters of device, peripheral speed of gripping members, friction coefficients between products and working elements of device contacting with them in process of gripping, friction coefficients between products at their interlocking. Results of theoretical study of probability of gripping of items and feed rate of improved device at various values of clearance by pitch, ratios of length and diameter of items, values of friction coefficient between items and device are given. Maximum device feed rate values were obtained at various parameters.

Keywords: hopper feeder, probability of product capture, product orientation, end asymmetry workpieces, feed rate.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-2-76-84

EDN: UKQWMX

REFERENCES

1. *Lukin, S.A.* Avtomaticheskaya zagruzka shtuchnyx zagotovok v patronnom proizvodstve / S.A. Lukin, S.A. Vasin // Sb. tr. 60-j Nauchno-prakticheskoy konferencii professorsko-prepodavatelskogo sostava TulGU s vsrossijskim uchastiem: sbornik dokladov v 2 ch. / pod red. d-ra texn. nauk M.S. Vorotilina. – Ch. 2. Tula: Izd-vo TulGU, 2024. – pp. 143–148.
2. *Bakhno, A.L.* Napravleniya proektirovaniya mexanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochno-orientiruyushhikh ustrojstv dlya zagotovok razlichnykh tiporazmerov / A.L. Bakhno, I.V. Puzikov, E.V. Pantyukhina // Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Texnicheskie nauki. – 2025. – № 12. – pp. 508–514.
3. *Golubenko, V.V.* Mexanicheskie diskovye bunkernye zagruzochnye ustrojstva dlya sterzhnevnykh zagotovok s asimmetriey torczov / V.V. Golubenko, E.V. Davydova, V.V. Prejs // Mashinostroenie i texnosfera XXI veka; sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. – 2011. – pp. 184–187.
4. *Borisov, A.A.* Avtomaticheskoe orientirovanie shtuchnyx predmetov v mexanicheskix bunkernykh zagruzochno-orientiruyushhikh ustrojstvax / A.A. Borisov, S.A. Vasin, E.V. Pantyukhina // V sbornike: 60-ya Nauchno-prakticheskaya konferenciya professorsko-prepodavatelskogo sostava TulGU s vsrossijskim uchastiem. Sbornik dokladov. V 2-x chastyax: ch.2. – Tula, 2024. – pp. 136–142.
5. *Dyakova, E.V.* Obespechenie osnovnyx pokazatelej kachestva bunkernykh zagruzochnykh ustrojstv pri zagruzke detalej s asimmetriey po torczam / E.V. Dyakova, E.V. Pantyukhina, I.V. Puzikov // Avtomatizaciya i energosberezhenie v mashinostroenii, energetike i na transporte: Materialy XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Vologda, 08 dekabrya 2022 goda / Otvetstvennyj redaktor V.A. Rakov. – Vologda: Vologodskij gosudarstvennyj universitet, 2023. – pp. 32–36.
6. *Davydova, E.V.* Mexanicheskie bunkernye zagruzochnye ustrojstva v pishhevoj promyshlennosti: pod nauch. red. V.V. Prejsa / E.V. Davydova, V.V. Prejs. – Tula: Izd-vo TulGU, 2012. – 168 p.
7. *Vasin, S.A.* Metodika opredeleniya veroyatnosti zakhvata asimmetrichnykh detalej formy tel vrashheniya v diskovykh bunkernykh zagruzochno-orientiruyushhikh ustrojstvax / S.A. Vasin, E.V. Pantyukhina // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. Mashinostroenie. – 2023. – № 3. – pp. 64–88.
8. *Usenko, N.A.* Sistemy avtomaticheskoy zagruzki shtuchnyx predmetov obrabotki v texnologicheskie mashiny-avtomaty: uchebnoe posobie / N.A. Usenko, V.V. Prejs, E.V. Davydova, E.S. Bocharova; Pod nauchnoj redakciej V.V. Prejsa. – Tula: Tulskij gosudarstvennyj universitet, 2013. – 312 p.
9. *Prejs, V.F.* Avtomatizaciya zagruzki pressov shtuchnymi zagotovkami / V.F. Prejs [i dr.]; pod red. V.F. Prejsa. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 280 p.
10. *Pantyukhina, E.V.* Mexanicheskie bunkernye zagruzochnye ustrojstva dlya elementov patronov strelkovogo oruzhiya s neyavnoj asimmetriey / E.V. Pantyukhina, V.V. Prejs // Innovacionnye tehnologii i texnicheskie sredstva specialnogo naznacheniya: tr. XII obshherossijskoy nauchno-prakticheskoy konferencii: v 3 t. Ser. «Biblioteka zhurnala «Voenmex. Vestnik BGTU». – Sankt-Peterburg. – 2020. – pp.79–85.
11. *Davydova, E.V.* Avtomaticheskaya zagruzka sterzhnevnykh predmetov obrabotki s neyavno vyrazhennoj asimmetriey po torczam / E.V. Davydova, V.V. Prejs. – Tula: Izd-vo TulGU, 2009. – 112 p.
12. *Pantyukhina, E.V.* Proektirovanie mexanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochnykh ustrojstv dlya predmetov obrabotki formy tel vrashheniya s neyavnoj asimmetriey / E.V. Pantyukhina. – Tula: Izd-vo TulGU, 2024. – 228 p.

13. *Pantyukhina, E.V.* Nauchnye osnovy proektirovaniya mexanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochnykh ustroystv dlya detalej s neyavnoj asimmetriey po torczam / E.V. Pantyukhina, V.V. Prejs // *Sovremennye tekhnologii sborki: materialy VII Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar.* – M., 2021. – pp. 111–120.
14. *Borisov, A.A.* Universalnye konstrukcii mexanicheskikh diskovykh bunkernykh zagruzochno-orientiruyushchikh ustroystv dlya asimmetrichnykh po torczam zagotovok tel vrashheniya / A.A. Borisov, E.V. Pantyukhina, S.A. Vasin, A.S. Klentak // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* – 2024. – T. 26. – № 6(122). – pp. 109–114.
15. *Puzikov, I.V.* Primenenie universalnogo bunkernogo zagruzochnogo ustrojstva s radialnymi karmanami i aktivnym orientirovaniem dlya shirokoj nomenklatury asimmetrichnykh po torczam izdelij / I.V. Puzikov // *Vestnik Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Avtomatizaciya: problemy, idei, resheniya: sbornik nauchnyx trudov Nacionalnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, Tula, 10 oktyabrya 2025 goda.* – Tula: Tul'skij gosudarstvennyj universitet, 2025. – pp. 72–77.
16. Pat. RU 220505 U1 Rossijskaya Federaciya. MPK B23Q 7/02. Bunkernoe zagruzochnoe ustrojstvo dlya cilindricheskix zagotovok s cilindricheskoy formoj odnogo iz torczov i konicheskoy formoj drugogo/ V.V. Prejs, E.V. Pantyukhina, I.V. Puzikov – № 2023108055; zayavl. 30.03.2023; opubl. 18.09.2023. – Byul. № 26.
17. *Puzikov, I.V.* Etapy proektirovaniya diskovogo bunkernogo zagruzochnogo ustrojstva s radialnymi karmanami, kopirom i reguliruemym kolcevim orientatorom dlya mnogokomponentnykh asimmetrichnyx izdelij tel vrashheniya / I.V. Puzikov, E.V. Pantyukhina, S.A. Vasin [i dr.] // *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya.* – 2025. – № 3(99). – pp. 222–230.
18. *Puzikov I. V.* Razrabotka matematicheskikh modelej veroyatnosti zaxvata odno- i mnogokomponentnykh asimmetrichnyx izdelij v universalnom bunkernom zagruzochnom ustrojstve s radialnymi karmanami i aktivnym orientirovaniem / I. V. Puzikov, S. A. Vasin, E. V. Pantyukhina, A. L. Baxno // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.* 2026. – T. 28. – № 1. – pp. 5–14.

Alexander Bakhno, Candidate of Technical Sciences, First Deputy General Director. E-mail: Bahno.al@tulatoz.ru
Elena Pantyukhina, Doctor of Technical, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Automation and Robotics. E-mail: e.v.pant@mail.ru
Sergey Vasin, Doctor of Technical, Professor, Professor-Consultant of the Department of Engineering Technology. E-mail: vasin_sa53@mail.ru