



## Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами

Е.В. Пантюхина<sup>1✉</sup>, А.А. Борисов<sup>2</sup>, С.А. Васин<sup>3</sup>, А.С. Клентак<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

<sup>2</sup>3-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации, Нижегородская область, Смолино, Россия

<sup>4</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, Самара, Россия

**Резюме.** Цель – разработать математическую модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами. Модель должна учитывать влияние на производительность устройства его конструктивных и кинематических параметров, а также параметров заготовок. Объектом исследований явились механические дисковые бункерные загрузочно-ориентирующие устройства с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами, в которых реализовано активное ориентирование упомянутых заготовок путем их опрокидывания на специальных опорах, размещенных под вращающимся диском. Опрокидывание осуществляется под действием силы тяжести. При построении математических моделей использовались методы теории вероятностей, аналитической пространственной геометрии, теоретической механики и общие физические законы. В работе рассматривается методика построения математической модели вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в исследуемых устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами. Предложен алгоритм определения каждого коэффициента разработанной модели. Разработанная модель представляет собой произведение вероятности нахождения стержневых заготовок по направлению к тангенциально расположенному карману в благоприятном для их захвата положении, вероятности отсутствия помех при захвате заготовки от ее взаимосцепляемости с другими заготовками и вероятности отсутствия помех от окружной скорости захватывающих органов устройства. Таким образом, применение разработанных математических моделей вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения позволяет на ранних этапах проектирования оценить с высокой точностью фактическую производительность механических дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами.

**Ключевые слова:** вероятность захвата, автоматическая загрузка, ориентирование заготовок, бункерное загрузочно-ориентирующее устройство

**Для цитирования:** Пантюхина Е.В., Борисов А.А., Васин С.А., Клентак А.С. Математическое описание вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах с наклонным диском и тангенциальными карманами // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 4. С. 466–476. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-466-476>. EDN: TODCIN.

## Mathematical description of the probability of capturing rod-shaped stepped blanks in hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets

Elena V. Pantuykhina<sup>1✉</sup>, Alexander A. Borisov<sup>2</sup>, Sergey A. Vasin<sup>3</sup>, Anna S. Klentak<sup>4</sup>

<sup>1,3</sup>Tula State University, Tula, Russia

<sup>2</sup>3rd Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Nizhny Novgorod Region, Smolino, Russia

<sup>4</sup>Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

**Abstract.** In this work, we present a mathematical model of the capture probability of rod-shaped stepped blanks in mechanical disk hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets. The model must take into account the influence of the design and kinematic parameters of the device on its performance, as well as those of the workpieces. The object of the research was a mechanical disk hopper feeding device having an inclined rotating disk and pockets tangentially located along its periphery, whose active orientation of the mentioned blanks is implemented by overturning them on special supports placed under the rotating disk. The tipping action is carried out under the action of gravity. For the construction of mathematical models, methods based on probability theory, analytical spatial geometry, theoretical mechanics, and general physical laws were used. The methodology for constructing a mathematical model of the probability of capture of rod-shaped step blanks of bodies of revolution in the studied devices with an inclined disk and tangential pockets is described. Algorithms for determining each coefficient of the developed model are presented. The developed model is a product of the probability of finding the rod blanks in a position favorable for their gripping in the direction of the tangentially located pocket, the probable absence of encumbrance during gripping of the blank due to its interlocking with other blanks, and the probable absence of encumbrance as a result of the peripheral speed of the gripping organs of the device. Thus, the developed mathematical models for calculating the capture probability of rod-shaped step blanks of rotational parts can be used at early design stages to estimate with high accuracy the actual productivity of mechanical disk hopper feeding devices with an inclined rotating disk and pockets tangentially located along their periphery.

**Keywords:** gripping probability, automatic feeding, workpiece orientation, hopper feeding-orienting device

**For citation:** Pantuykhina E.V., Borisov A.A., Vasin S.A., Klentak A.S. Mathematical description of the probability of capturing rod-shaped stepped blanks in hopper feeding devices with an inclined disk and tangential pockets. *iPolytech Journal*. 2024;28(4):466-476. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-4-466-476>. EDN: TODCIH.

### ВВЕДЕНИЕ

Механические дисковые бункерные загрузочно-ориентирующие устройства (БЗУ) применяются достаточно широко в массовых производствах (например, производство патронов различных видов оружия, строительно-монтажных патронов, продукции машино- и приборостроения, пищевой продукции), где для выполнения некоторых видов технологических операций (вытяжка, сборка, упаковка и др.) в автоматические машины и линии требуется автоматизированная подача с производительностью свыше 150 шт/мин небольших заготовок различных форм в требуемом ориентированном положении<sup>5</sup> [1, 2]. При этом для выполнения данной задачи БЗУ должны надежно функционировать, обеспечивая безотказную работу технологического оборудования без сбоев и простоев<sup>6</sup> [3–7].

Основная особенность БЗУ, заключающаяся в вероятностном принципе их работы при захвате одной заготовки из некоторого объема засыпанных в бункер заготовок с помощью захватывающих органов в виде карманов, требует при проектировании БЗУ решения целого комплекса задач: разработка конструктивных ограничений на захватывающие и ориентирующие органы БЗУ, при которых будут обеспечено надежное функционирование устройства, построение математических моделей процессов ориентирования и выдачи заготовок в БЗУ,

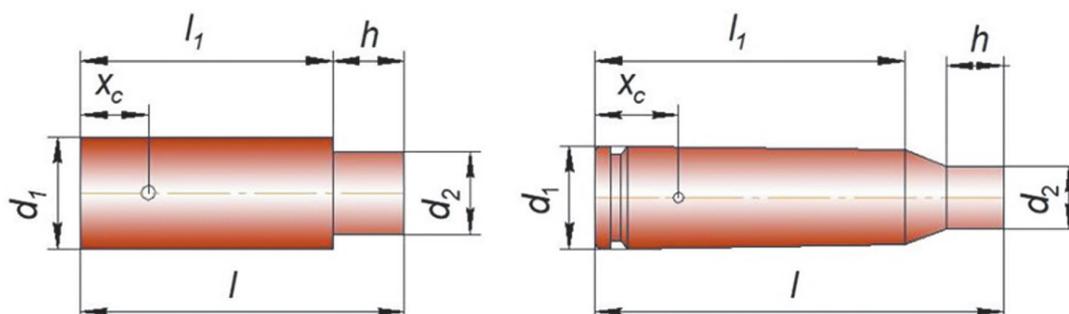
<sup>5</sup>Бляхеров И.С., Варьяш Г.М., Иванов А.А., Клусов И.А., Комаров Г.В., Маткин Ю.Л. [и др.]. Автоматическая загрузка технологических машин: справочник. М.: Машиностроение, 1990. 400 с. EDN: WQPXRB.

<sup>6</sup>Волчкевич Л.И. Надежность автоматических линий: учеб. пособ. М.: Машиностроение, 1989. 308 с.

позволяющие определить кинематические ограничения на захватывающие и ориентирующие органы БЗУ, и разработка математических моделей вероятности захвата заготовок в БЗУ для описания производительности БЗУ [8–10]. Наиболее важной из представленных задач является разработка математической модели вероятности захвата, которая позволяет описать влияние на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения, уровня заполнения бункера заготовками и, исходя из этого, определить условия, при которых производительность БЗУ будет максимальной [11].

По расположению захватывающих органов механические дисковые БЗУ бывают двух типов: с радиально расположенными и тангенциально расположенными захватывающими органами. Каждый из этих типов БЗУ характеризуется целым рядом особенностей в зависимости от конфигурации органов захвата, способа ориентирования заготовок и их выдачи из захватывающих органов [12–14]. В зависимости от формы, свойств и геометрических размеров заготовок выбирается наиболее оптимальный из всех существующих видов БЗУ [4, 12, 15].

Для стержневых ступенчатых заготовок тел вращения (рис. 1), отличающихся явным смещением центра масс относительно продольной оси симметрии, радиальное расположение карманов существенно снижает вероятность их захвата, что отрицательно сказывается на производительности БЗУ. Использование в таких типах БЗУ пассивного ориентирования заготовок вместо активного приводит не только к еще большему снижению производительности, но и повышению количества бракованных (деформированных при ворошении в бункере БЗУ) заготовок, которые могут многократно захватываться и сбрасываться при их неправильном захвате обратно в общую массу, что является недопустимым при производстве некоторых видов изделий, например ответственного назначения.

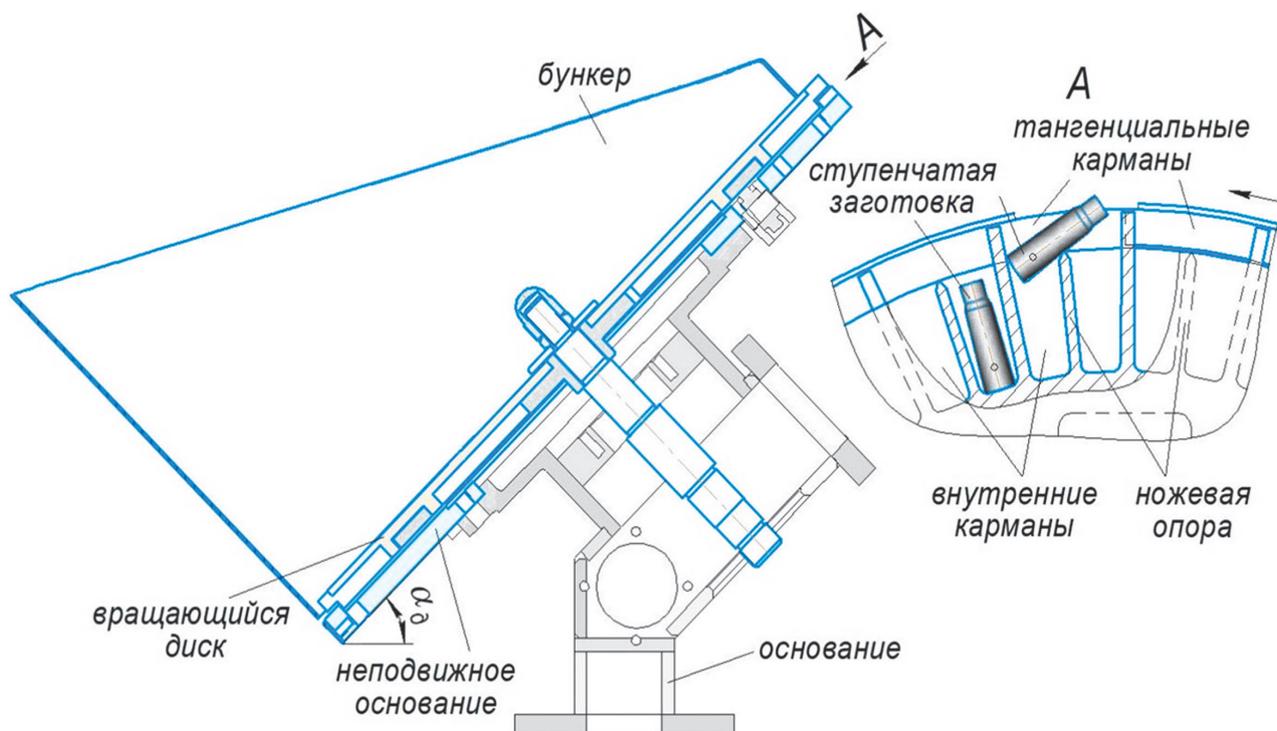


**Рис. 1.** Некоторые виды стержневых ступенчатых заготовок и их основные геометрические параметры  
**Fig. 1.** Some types of stepped rod blanks and their basic geometric parameters

В связи с этим использование механических дисковых БЗУ с тангенциально расположенными органами захвата, в которых реализовано активное ориентирование (рис. 2), наиболее целесообразно с точки зрения повышения надежности и производительности БЗУ [16].

В БЗУ данного типа сначала обеспечивается захват заготовок тангенциально расположенными карманами в одном из двух положений, затем захваченные заготовки вращающимся диском направляются в верхнюю часть бункера. В этой зоне на ножевых опорах происходит активное ориентирование заготовок под действием смещения их центра масс так, что в каком бы из двух своих положений не была захвачена заготовка, она в любом случае окажется своим тяжелым торцом в одном из внутренних карманов, разделенных ножевой опорой (см. рис. 1).

Наличие математических моделей вероятности захвата различных стержневых ступенчатых заготовок в БЗУ с тангенциальными карманами на ранних этапах проектирования способствует выбору наиболее оптимальных параметров БЗУ, при которых будут обеспечены надежное функционирование БЗУ и максимальная производительность для каждой конкретной заготовки, что является актуальной задачей.



**Рис. 2.** Механическое дисковое бункерное загрузочно-ориентирующее устройство с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами и принцип его работы при ориентировании заготовок  
**Fig. 2.** Mechanical disk hopper loading and orienting device with a tilted rotating disk and pockets tangentially located along its periphery and its operation principle under workpiece orienting

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью является разработка математической модели вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами, позволяющая теоретически описать влияние на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения между ними и учесть уровень заполнения бункера заготовками.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе выполнения работы были проведены теоретические исследования процессов захвата стержневых ступенчатых заготовок с применением математических и компьютерных моделей, построение которых базировалось на методах теории вероятностей, аналитической пространственной геометрии, теоретической механики и общих физических законах.

Математическая модель производительности дискового БЗУ (в независимости от его типа) определяется теоретической или максимально возможной производительностью  $\Pi$  БЗУ и вероятностью  $\eta$  захвата в нем заготовок при минимальном их заполнении бункера БЗУ по формуле:

$$\Pi = \Pi_m \eta = k \cdot n \cdot \eta = \frac{60v}{t} \eta, \quad (1)$$

в которой теоретическая производительность определяется или произведением числа захватывающих органов (карманов)  $k$  и частоты их вращения  $n$ , или отношением окружной карманов  $v$  и их шага  $t$  [16].

Вероятность захвата описывается на основе предложенной в работах [17, 18] концепции в виде выражения:

$$\eta = \eta_{max} \left( 1 - \frac{v^4}{v_{пред}^4} \right), \quad (2)$$

где  $\eta_{max}$  – максимальное значение вероятности захвата (при  $v \rightarrow 0$ ), представляющее собой произведение вероятностей  $p_i$  нахождения заготовок на пути к карману в положении, благоприятном для захвата, и  $p_c$  того, что захвату заготовок не мешает их сцепляемость друг с другом;  $v_{пред}$  – предельное значение окружной скорости, при которой в карман не успеет запасть какая-либо заготовка.

Адекватность предложенной концепции была подтверждена результатами многочисленных экспериментальных исследований [19–22]. Основываясь на данной концепции для описания влияния на производительность БЗУ его конструктивных и кинематических параметров, геометрических параметров заготовок, коэффициентов трения между ними, разработаем математическую модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами.

Определение всех коэффициентов математической модели производительности, представленной выражениями (1) и (2), при захвате стержневых ступенчатых заготовок в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами осуществляется в следующей последовательности.

Вероятность  $p_i$  определяют все поверхности заготовок, из которых возможен их захват тангенциальным карманом, и участок зоны захвата, на котором располагаются заготовки. Вероятность  $p_c$  определяется площадью всех возможных пар сопрягаемых поверхностей заготовок и возможностью их сочетания без разъединения. Это в совокупности позволит определить максимальное значение вероятности захвата  $\eta_{max}$ . Предельное значение окружной скорости  $v_{пред}$  определяется исходя из гипотезы, заключающейся в том, что  $\eta = 0$  тогда, когда сообщенная заготовке движущимся карманом кинетическая энергия достаточна для ее выброса из кармана на некоторую высоту, определяемую конструкцией БЗУ [16].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.

Используя предложенную концепцию, определим для одного из видов стержневых ступенчатых заготовок каждый из параметров, что в совокупности позволит получить математическую модель вероятности захвата и производительности наклонного дискового БЗУ с тангенциальными карманами.

При определении вероятности  $p_i$  исходим из предположения, что для рассматриваемого БЗУ захват заготовок осуществляется при их нахождении на боковых поверхностях III и IV, имеющих общую длину  $l$ . Поэтому заготовка должна располагаться на вращающемся диске и повернуться к карману именно этими поверхностями. На рис. 3 приведены расчетные схемы для определения данной вероятности.

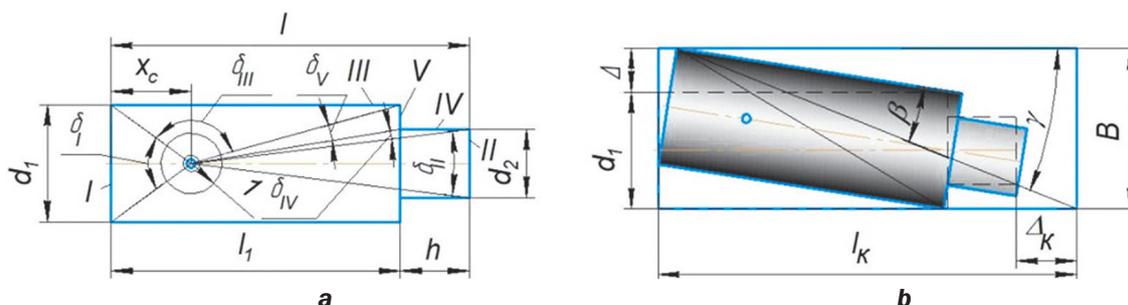


Рис. 3. Расчетные схемы для определения вероятности  $p_i$

Fig. 3. Analytical models for determining  $p_i$  probability

В работе [18] для каждой из поверхностей заготовки, имеющей неявную асимметрию, было рассмотрено определение вероятностей того, что засыпанные в бункер заготовки после падения окажутся на вращающемся диске любой из своих сторон. Так как заготовки имели неявную асимметрию, при которой диаметры торцов отличаются друг от друга несущественно (на 10–40%), то было принято допущение – боковую поверхность принимать единой, т.е.  $p_{III} = 1 - (p_I + p_{II})$ . Для заготовок, у которых отличие более 40%, вероятность нахождения заготовки в благоприятном для захвата положении на поверхности диска будет определяться по формуле:  $p_{\Sigma} = p_{III} + p_{IV} = 1 - (p_I + p_{II} + p_V)$ . Каждая из вероятностей будет определяться углами  $\delta_I, \delta_{II}, \delta_{III}, \delta_{IV}, \delta_V$  с помощью расчетной схемы (см. рис. 3 а), а соответствующие им вероятности каждой из поверхностей ступенчатой заготовки по формулам:

$$p_I = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_I)]; \quad p_{II} = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_{II})]; \quad p_{III} = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_{III})]; \\ p_{IV} = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_{IV})]; \quad p_V = 0,5[1 - \cos(0,5\delta_V)].$$

После этого необходимо определить максимальное  $p_{i \max}$  и минимальное  $p_{i \min}$  значения вероятности  $p_i$ , соответствующие участкам зоны захвата, где заготовки располагаются разрозненно в один и несколько слоев. В рассматриваемом БЗУ с тангенциальными карманами и активным ориентированием, соответственно, с использованием расчетных схем (см. рис. 3 а, б) получим:

$$p_{i \max} = \frac{p_{III}}{\pi} (\delta_{III} + \delta_{IV} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_{\partial}}), \quad p_{i \min} = \frac{p_{III}}{\pi} (\gamma - \beta),$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между заготовками и вращающимся диском;  $\alpha_{\partial}$  – угол наклона вращающегося диска, рад (см. рис. 2);  $\gamma, \beta$  – углы, определяемые с помощью расчетной схемы (см. рис. 3 б), рад.

Тогда вероятность  $p_i$  определится по формуле:  $p_i = 1 - (1 - p_{i \max})^3 (1 - p_{i \min})^k$  или

$$p_i = 1 - \left[ 1 - \frac{p_{III}}{\pi} (\delta_{III} + \delta_{IV} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_{\partial}}) \right]^3 \left[ 1 - \frac{p_{III}}{\pi} (\gamma - \beta) \right]^k, \quad (3)$$

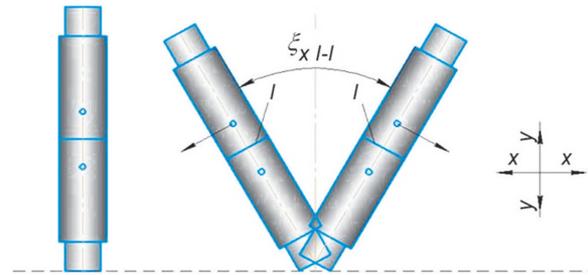
где  $k$  – число заготовок, которое может разместиться в зоне расположения карманов, определяемой с помощью системы линейных уравнений, полученных при анализе граничных условий процесса захвата.

Для определения вероятности  $p_c$  определяются площади всех поверхностей заготовки, а затем рассматриваются все возможные пары их сопряжений; при этом учитываются сопряжения только тех поверхностей заготовок, которые возможно сочетать без разъединения, что характеризуется углом  $\xi$ . Данный угол показывает свободу перемещения для каждой пары сопрягаемых поверхностей заготовки в плоскостях  $x$  и  $y$  и учитывает влияние коэффициентов трения  $p_c$  заготовок друг с другом.

Вероятность  $p_c$  в математической модели вероятности захвата позволяет учесть влияние на производительность БЗУ взаимосцепляемости заготовок при захвате и определяется по выражению:

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot n \cdot (F_I + F_{II} + \dots + F_V)} \sum_{i=1}^{n^2} \left[ \left\{ \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2} \right\}_{I-II} \times (F_I + F_{II})_i + \dots \right], \quad (4)$$

где  $n$  – количество поверхностей заготовки ( $n = 5$  для ступенчатых заготовок) и число  $n^2$  их сочетаний;  $F_I, F_{II}, \dots, F_V$  – площади всех поверхностей заготовки,  $m^2$ ;  $\xi_{xi}, \xi_{yi}$  – углы возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей с площадями  $F_I$  и  $F_{II}$  без отрыва по плоскостям  $x$  и  $y$ , соответственно (рис. 4), на примере варианта соприкосновения I-II (аналогично записываются выражения для каждой пары всех соприкасающихся поверхностей, в данном случае еще 24).



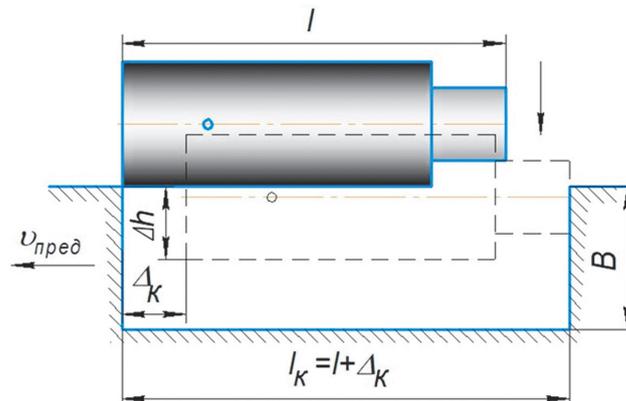
**Рис. 4.** Расчетная схема определения углов  $\xi_{xi}$ ,  $\xi_{yi}$  возможного поворота двух соприкасающихся поверхностей двух заготовок на примере сочетания I-I

**Fig. 4.** Analytical model for determining  $\xi_{xi}$ ,  $\xi_{yi}$  angles of possible rotation of two contacting surfaces of two workpieces on the example of I-I combination

Предельное значение окружной скорости  $v_{пред}$  определяется из условий движения катящейся по направлению к движущемуся карману заготовки по поверхности вращающегося диска по формуле, представленной в работе [16]:

$$v_{пред} = \Delta_K \sqrt{\frac{mgd_1^2 \sin \alpha_{\partial}}{2\Delta h(md_1^2 + 4J_u)}}, \tag{5}$$

где  $\Delta_K$  – зазор между стенкой кармана и заготовкой, м;  $m$  – масса заготовки, кг;  $\Delta h$  – глубина кармана, на которую должна запасть заготовка, чтобы ее не выбросило из кармана, м;  $J_u$  – момент инерции центра масс заготовки относительно центра качения, кг·м<sup>2</sup> (рис. 5).



**Рис. 5.** Расчетная схема для определения  $v_{пред}$

**Fig. 5.** Analytical model for determining  $v_{пред}$

Тогда математическая модель производительности механического дискового БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами для стержневых ступенчатых заготовок с использованием выражений (1)–(5) и после выполнения преобразований будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{60v}{t} \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{\rho_{III}}{\pi} (\delta_{III} + \delta_{IV} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha_{\partial}}) \right]^3 \left[ 1 - \frac{\rho_{III}}{\pi} (\gamma - \beta) \right]^k \right] \times \\ & \times \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot n \cdot (F_I + F_{II} + \dots + F_V)} \sum_{i=1}^{n^2} \left[ \left\{ \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2} \right\}_{I-II} \times (F_I + F_{II})_i + \dots \right]_i \right] \times \\ & \times \left( 1 - \frac{v^4 \cdot 4(\Delta h(md_1^2 + 4J_u))^2}{\Delta_K^4 (mgd_1^2 \sin \alpha_{\partial})^2} \right). \end{aligned} \tag{6}$$

Разработанная математическая модель включает параметры БЗУ и загружаемых заготовок, что позволяет выбрать оптимальные параметры БЗУ для обеспечения требуемых значений производительности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработанная математическая модель вероятности захвата стержневых ступенчатых заготовок тел вращения в механическом дисковом БЗУ с наклонным вращающимся диском и тангенциально расположенными по его периферии карманами позволяет определить диапазоны фактической производительности данного БЗУ и выявить значения его параметров, при которых будут обеспечены ее требуемые значения. Данная модель представляет собой совокупность математических зависимостей, позволяющих описать влияние на производительность конструктивных и кинематических параметров БЗУ, геометрических параметров загружаемых заготовок, учесть коэффициент трения материалов, из которых они изготовлены. Наличие таких моделей на ранних этапах проектирования существенно сокращает материальные и временные затраты, позволяет оптимизировать процесс автоматической загрузки, обеспечить его эффективность в целом.

## **Список источников**

1. Sandier B.Z. Robotics: designing the mechanisms for automated machinery. 2nd ed. San Diego, California: ACADEMIC PRESS, 1999. 433 p.
2. Chua P. E-learning of automated parts feeding // Assembly Automation. 2006. Vol. 26. No. 4. P. 323–334. <https://doi.org/10.1108/01445150610705245>.
3. Преис В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 10. С. 17–22. EDN: WOWBKP.
4. Пантюхина Е.В., Васин С.А., Пантюхин О.В. Обеспечение надежного ориентирования асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. № 1. С. 132–142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142>. EDN: BWQJWT.
5. Преис В.В. Прогнозирование надежности автоматической сборочной линии с учетом потерь комплектующих элементов при сборке многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2024. № 4. С. 153–156. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2024-25-4-153-156>. EDN: JKLCFQ.
6. Преис В.В. Моделирование надежности резервированных роторных систем автоматической загрузки штучных предметов обработки // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. 2022. № 2. С. 52–62. EDN: LHXCUI.
7. Хачатурян А.В., Преис В.В. Теоретическая и экспериментальная оценка времени пассивного ориентирования штучных деталей, асимметричных по торцам, в механическом зубчатом бункерном загрузочном устройстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 303–312. EDN: BHDDHC.
8. Дьякова Э.В. Современные концепции теорий математического моделирования производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 4. С. 58–62. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-4-58-62>. EDN: ZOSIKV.
9. Лукин С.А. Математическая модель вероятности захвата стержневых заготовок в форме колпачка в бункерном загрузочном устройстве с зубьями и регулируемым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 8. С. 3–10. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-3-4>. EDN: QFNVNS.
10. Pantuykhina E.V., Preis V.V., Pantuykhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1791. P. 012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012105>. EDN: RLMQHB.
11. Пузиков И.В. Трехмерный визуальный анализ производительности вертикального бункерного загрузочного устройства с роликами для ступенчатых трехсоставных колпачков типа push-pull // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 17–21. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-17-21>. EDN: HMBKSJ.
12. Boothroyd G. Assembly automation and product design. Boca Raton: CRC Press, 2005. 536 p. <https://doi.org/10.1201/9781420027358>.
13. Ghosh S., Singh S.P. Assembly line – theory and practice. Rijeka: Intech Europe, 2011. 264 p. <https://doi.org/10.5772/824>.
14. Дьякова Э.В., Пузиков И.В. Алгоритм расчета и проектирования бункерных загрузочных устройств для деталей формы тел вращения с асимметрией по торцам // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. <https://ipolytech.elpub.ru>

- В.Г. Шухова, посвящ. 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (г. Белгород, 16–17 мая 2023 г.). Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 133–137. Т. 12. EDN: IRXELZ.
15. Прейс В.В., Хачатурян А.В. Конструирование и расчет механических зубчатых бункерных загрузочных устройств с кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 10. С. 449–455. <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2020-21-10-449-455>. EDN: MWHAWX.
16. Бляхеров И.С., Прейс В.В., Усенко Н.А. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками. М.: Машиностроение, 1975. 280 с. EDN: UCWMWL.
17. Pantyukhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2020. Vol. 1546. P. 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012024>. EDN: BHFAPW.
18. Васин С.А., Пантюхина Е.В. Методика определения вероятности захвата асимметричных деталей формы тел вращения в дисковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2023. № 3. С. 64–88. <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-64-88>. EDN: CUEBFL.
19. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., Dyakova E.V. Results of a theoretical and experimental research of a vertical hopper feeding device with rollers for flat and close-to-equal-sized parts with implicit asymmetry // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2021. Vol. 1901. P. 012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012017>. EDN: ZGMMIC.
20. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Khachaturian A.V. Feed rate evaluation of mechanical toothed hopper-feeding device with ring orientator for parts, asymmetric at the ends // Journal of Physics: IOP Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 032032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032032>. EDN: VJQPIJ.
21. Дьякова Э.В. Теоретическое и экспериментальное исследование производительности усовершенствованного бункерного загрузочного устройства для полуфабрикатов двухстороннего выдавливания // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2024. № 26. С. 86–94. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-86-94>. EDN: UZUXDG.
22. Хачатурян А.В., Прейс В.В., Токарев В.Ю. Экспериментальные исследования производительности зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором для пустотелых деталей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 5. С. 28–35. EDN: ZXMHXV.

### References

1. Sandier B.Z. *Robotics: designing the mechanisms for automated machinery*. 2nd ed. San Diego, California: ACADEMIC PRESS; 1999, 433 p.
2. Chua P. E-learning of automated parts feeding. *Assembly Automation*. 2006;26(4):323-334. <https://doi.org/10.1108/01445150610705245>.
3. Preis V.V. Reliability of automatic rotary conveyor lines for multi-element product assembly. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2003;10:17-22. (In Russ.). EDN: WOWBKP.
4. Pantyukhina E.V., Vasin S.A., Pantyukhin O.V. Ensuring a reliable orientation of asymmetric parts of the form of rotation bodies in disk hopper feeding and orienting devices. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2024;22(1):132-142. (In Russ.). <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-132-142>.
5. Preis V.V. Forecasting automatic assembly line reliability considering element losses during assembly of multi-element products. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2024;4:153-156. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2024-25-4-153-156>. EDN: JKLCFQ.
6. Preis V.V. Simulation of reliability of redundant rotor feeding systems of piece processing items. *Avtomatizaciya i izmereniya v mashino-priborostroenii*. 2022;2:52-62. (In Russ.). EDN: LHXCUU.
7. Khachaturyan A.V., Preis V.V. Theoretical and experimental estimation of passive time orientation of piece parts, asymmetric at the ends, in the mechanical toothed hopper feeding device. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;6:303-312. (In Russ.). EDN: BHDDHC.
8. Diakova E.V. Modern concepts of theories of mathematical modeling of performance of mechanical disk hopper-feeder devices. *Proceedings of the Tula State University*. 2021;4:58-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-4-58-62>. EDN: ZOSIKV.
9. Lukin S.A. Mathematical model of probability of gripping rod blanks in form of cap in hopper feeder with teeth and adjustable orientator. *Proceedings of the Tula State University*. 2024;8:3-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-8-3-4>. EDN: QFNVNS.
10. Pantyukhina E.V., Preis V.V., Pantyukhin O.V. Passive orientation of the parts in the mechanical disk hopper feeding device with an annular orientator and radial grooves. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2021;1791:012105. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1791/1/012105>. EDN: RLMQHB.
11. Puzikov I.V. Three-dimensional visual performance analysis vertical hopper feeding device with rollers for stepped three-part push-pull caps. *Proceedings of the Tula State University*. 2021;5:17-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-17-21>. EDN: HMBKSJ.
12. Boothroyd G. *Assembly automation and product design*. Boca Raton: CRC Press; 2005, 536 p. <https://doi.org/10.1201/9781420027358>.
13. Ghosh S., Singh S.P. *Assembly line – theory and practice*. Rijeka: Intech Europe; 2011, 264 p. <https://doi.org/10.5772/824>.

14. Diakova E.V., Puzikov I.V. Algorithm for calculating and designing hopper loading devices for parts of the revolution body shape with asymmetry along the ends. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im. V.G. Shuhova, posvyashchen-naya 170-letiyu so dnya rozhdeniya V.G. Shuhova = International scientific and technical conference of young scientists of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov dedicated to the 170<sup>th</sup> birth anniversary of V.G. Shukhov*. 16–17 May 2023, Belgorod. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; 2023, vol. 12, p. 133-137. (In Russ.). EDN: IRXELZ.
15. Preys V.V., Khachaturian A.V. Design and calculation of mechanical toothed hopper feeding devices with a ring orientator. *Assembly in mechanical engineering, instrumentation*. 2020;10:449-455. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/0202-3350-2020-21-10-449-455>. EDN: MWHAWX.
16. Blakherov I.S., Preis V.V., Usenko N.A. *Automation of loading of presses by piece blanks*. Moscow: Mashinostroenie; 1975, 280 p. (In Russ.). EDN: UCWMWL.
17. Pantuykhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2020;1546:012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012024>. EDN: BHFAPW.
18. Vasin S.A., Pantuykhina E.V. Method for determining probability of capturing the asymmetric parts with the rotation body shape in the disk hopper loading-orientation devices. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*. 2023;3:64-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-64-88>. EDN: CUEBFL.
19. Pantuykhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., Dyakova E.V. Results of a theoretical and experimental research of a vertical hopper feeding device with rollers for flat and close-to-equal-sized parts with implicit asymmetry. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2021;1901:012017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012017>. EDN: ZGMMIC.
20. Pantuykhina E.V., Preis V.V., Khachaturian A.V. Feed rate evaluation of mechanical toothed hopper-feeding device with ring orientator for parts, asymmetric at the ends. *Journal of Physics: IOP Conference Series*. 2019;1260:032032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/3/032032>. EDN: BJQPIJ.
21. Diakova E.V. Theoretical and experimental study of the performance of an improved hopper feeding device for semi-finished products of double-sided extrusion. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2024;26:86-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2024-26-86-94>. EDN: UZUXDG.
22. Khachaturian A.V., Preis V.V., Tokarev V.Yu. Experimental research of the productivity of a toothed hopper feeding device with the ring orientator for hollow parts. *Proceedings of the Tula State University*. 2019;5:28-35. (In Russ.). EDN: ZXMHXV.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пантюхина Елена Викторовна,**

Д.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Промышленная  
автоматика и робототехника»,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия  
✉ e.v.pant@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0200-7321>

**Борисов Александр Александрович,**

заместитель начальника отдела,  
начальник лаборатории научно-исследовательского  
испытательного отдела,  
3-й Центральный научно-исследовательский институт  
Министерства обороны Российской Федерации,  
606081, Нижегородская область,  
пос. Смолино, Россия  
boris912@mail.ru

**Васин Сергей Александрович,**

Д.т.н., профессор,  
профессор-консультант кафедры  
«Технология машиностроения»,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Россия  
vasin\_sa53@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena V. Pantuykhina,**

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Industrial Automation and Robotics,  
Tula State University,  
92, Lenin pr., Tula 300012, Russia  
✉ e.v.pant@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0200-7321>

**Alexander A. Borisov,**

Deputy Head of the Department,  
Head of the Laboratory of the Research  
and Testing Department, 3<sup>rd</sup> Central Research  
Institute of the Ministry of Defense of the  
Russian Federation, Smolino village, Nizhny  
Novgorod Region 606081, Russia  
boris912@mail.ru

**Sergey A. Vasin,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor-Consultant of the Department  
of Mechanical Engineering Technology,  
Tula State University,  
92, Lenin pr., Tula 300012, Russia  
vasin\_sa53@mail.ru

**Клентак Анна Сергеевна,**

к.т.н., доцент,  
доцент кафедры «Теплотехника  
и тепловые двигатели»,  
Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королёва,  
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, Россия  
anna\_klentak@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6311-1769>

**Anna S. Klentak,**

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department  
of Heat Engineering and Heat Engines,  
Samara National Research University  
named after Academician S.P. Korolev,  
34 Moskovskoye shosse, Samara 443086, Russia  
anna\_klentak@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-6311-1769>

**Заявленный вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 01.10.2024 г.; одобрена после рецензирования 15.11.2024 г.; принята к публикации 18.11.2024 г.

**Authors' contribution**

The authors contributed equally to the article.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 01.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 18.11.2024.