

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ЗАХВАТА АСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ФОРМЫ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ В ДИСКОВЫХ БУНКЕРНЫХ ЗАГРУЗОЧНО-ОРИЕНТИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

С.А. Васин

vasin\_sa53@mail.ru

Е.В. Пантюхина

e.v.pant@mail.ru

ТулГУ, г. Тула, Российская Федерация

---

### Аннотация

Автоматическую загрузку современного оборудования для сборки изделий осуществляют надежные системы, основным устройством которых является бункерное загрузочно-ориентирующее устройство. В последнее время появилось множество асимметричных деталей, в том числе с неявной асимметрией, в связи с этим возникает необходимость проектирования для захвата деталей устройств, оптимальных по всем параметрам. Однако вероятностный принцип работы и возможность функционирования устройств для захвата только конкретной детали с определенными геометрическими параметрами значительно усложняют их проектирование и требуют решения сложных многоуровневых задач, важнейшей из которых является определение производительности, а именно вероятности захвата деталей в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах. Приведена подробная методика, позволяющая для построения математической модели производительности определить вероятность захвата деталей в бункерных загрузочно-ориентирующих устройствах различных типов, реализующих разные способы захвата и ориентирования деталей формы тел вращения широкой номенклатуры как с неявной, так и явной асимметрией. Для построения математической модели вероятности захвата определены вероятности нахождения деталей в благоприятном для захвата положении при различном их ориентировании и предельной окружной скорости захватывающих органов бункерного загрузочно-ориентирующего устройства, а также при отсутствии

### Ключевые слова

*Бункерное загрузочно-ориентирующее устройство, ориентирование деталей, вероятность захвата деталей, автоматическая загрузка, производительность при загрузке деталей, детали с неявной асимметрией, автоматическая сборка*

помех от взаимосцепляемости деталей. Приведены Поступила 08.06.2023  
зависимости, позволяющие графически определить Принята 27.06.2023  
указанные параметры математической модели © Автор(ы), 2023

---

**Введение.** В различных отраслях машиностроения автоматическая загрузка современного оборудования для сборки изделий, состоящих из одного или более штучных элементов, например, деталей, компонентов, предметов обработки, должна осуществляться надежными системами [1, 2]. Системы автоматической загрузки обеспечивают подачу штучных элементов в требуемом ориентированном положении в соответствии с необходимыми темпом и режимом работы сборочного оборудования и включают в себя несколько различных устройств, основным из которых является бункерное загрузочно-ориентирующее устройство (БЗУ). В процессе работы БЗУ выполняет захват единичной детали из засыпанных в бункер, ориентирование и выдачу ее в ориентированном положении сначала в накопитель, а затем в механизм поштучной выдачи деталей к рабочим органам оборудования для сборки [3].

В связи с появлением в последние десятилетия асимметричных деталей, в том числе с неявной асимметрией, в отраслях специального машиностроения и других отраслях промышленности возникает необходимость проектирования оптимальных по всем параметрам конструкций БЗУ для асимметричных деталей широкой номенклатуры. Это требует решения сложных многоуровневых задач, обусловленных двумя основными причинами.

1. Каждое БЗУ используется только для конкретной детали с определенными геометрическими параметрами, изменение которых даже в пределах 5...10 % приведет к нарушению функционирования БЗУ и необходимости внесения существенных изменений в конструкцию его рабочих органов.

2. Вероятностный принцип работы БЗУ при захвате, ориентировании и выдаче деталей [4] затрудняет возможность оценки целесообразности внесенных изменений и делает невозможным определение фактической производительности вновь разработанного устройства по известным классическим формулам для расчета производительности и требует более детального анализа и синтеза [5].

Производительность механического дискового (карманчикового) БЗУ определяется по формуле

$$\Pi = 60 \frac{v}{t} \eta,$$

где  $v$ ,  $t$  — окружная скорость и шаг захватывающих органов (карманов);  $\eta$  — вероятность захвата деталей (коэффициент выдачи).

В работе [6] изложена общая концепция, позволяющая теоретически описать и без экспериментальных исследований оценить фактическую производительность некоторых типов механических дисковых БЗУ, усовершенствованных для загрузки деталей с неявной асимметрией [7], а также разработать математические модели производительности [8–11] и определить диапазоны ее максимальных значений. Верификация изложенной концепции проведена с использованием данных, полученных из экспериментальных исследований [12] и на лабораторных макетах [13, 14]. В результате проведенных исследований выявлена целесообразность использования изложенной концепции и для дисковых БЗУ других типов при загрузке деталей широкой номенклатуры, асимметричных по торцам.

*Цель настоящей работы* — разработка методики определения вероятности захвата асимметричных деталей для построения математической модели производительности дисковых БЗУ, а также расширения возможностей применения ранее предложенной концепции и для других типов БЗУ, реализующих различные способы захвата и ориентирования асимметричных по торцам деталей формы тел вращения. В настоящей работе решены задачи по определению вероятностей нахождения детали в положении, благоприятном для захвата при различных способах ее ориентирования и отсутствии помех от взаимосцепляемости деталей, предельной окружной скорости по захвату, что в совокупности позволит получить математическую модель вероятности захвата различных деталей в механических дисковых БЗУ. Предложены также зависимости, которые можно использовать для определения параметров математической модели.

**Результаты анализа существующих подходов для описания вероятности захвата деталей.** Попытки описания коэффициента  $\eta$  предпринимались советскими и зарубежными учеными и практически все полученные во второй половине XX в. модели опирались на экспериментальные исследования, проводимые на реальных конструкциях БЗУ для конкретных деталей [15–19]. Использование законов классической механики для каждого случая позволило получить граничные значения основных параметров некоторых типов БЗУ. Полученные модели для описания коэффициента  $\eta$  и граничных значений параметров БЗУ не учитывают влияние геометрических размеров и формы ориентируемых деталей, коэффициентов трения между деталями и элементами БЗУ и конструктивных параметров БЗУ, но дают точное представление о характере зависимости измене-

ния коэффициента  $\eta$  от частоты вращения диска или окружной скорости карманов БЗУ.

Принципиально иной подход к описанию коэффициента  $\eta$  с использованием теории вероятности предложен в [20], где отдельно рассмотрена каждая составляющая процесса захвата, а затем определено искомое значение коэффициента  $\eta$  в виде произведения всех вероятностей. Полученные для некоторых частных случаев и конкретных конструкций БЗУ модели для описания коэффициента  $\eta$  учитывали как геометрические размеры и форму ориентируемых деталей, так и конструктивные параметры БЗУ. Результаты сравнения коэффициентов  $\eta$ , полученных теоретически с использованием теории вероятности и экспериментально, совпадали только при минимальных частотах вращения диска, а значения некоторых вероятностей при расчете выходили за допустимые пределы [4]. Все это привело к разработке новой концепции, позволяющей теоретически описать коэффициент  $\eta$  в зависимости от геометрических параметров и формы деталей, конструктивных параметров БЗУ и окружной скорости захватывающих органов БЗУ, а также учесть влияние на процесс захвата материалов, из которых изготовлены БЗУ и загружаемые в них детали.

Согласно новой концепции, вероятность захвата деталей определяется выражением

$$\eta = \eta_{\max}(1 - \varepsilon v^4), \quad (1)$$

где  $\eta_{\max}$  — максимальное значение вероятности захвата, соответствующее окружным скоростям захватывающих органов, близким к нулю;  $\varepsilon$  — коэффициент, определяемый предельным значением окружной скорости  $v_{\text{пред}}$  захватывающих органов, при которой в карман не успевает попасть ни одна деталь [6].

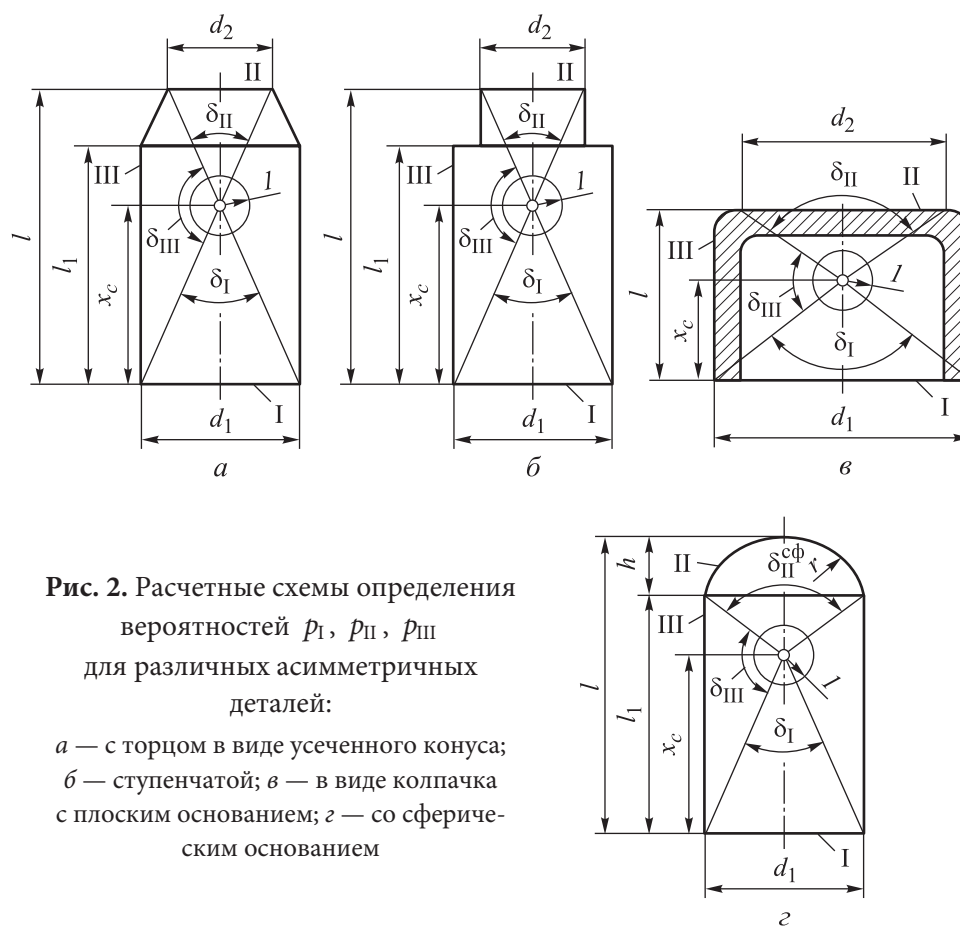
**Методика построения математической модели вероятности захвата.** Для построения математической зависимости коэффициента  $\eta$  от параметров деталей и БЗУ представим порядок и основные этапы определения каждого параметра (коэффициента  $\eta$  и вероятности) модели в виде схемы (рис. 1). Штриховыми показаны траектории расчета, которые выбираются в зависимости от конструктивных особенностей БЗУ и реализуемых способов захвата и ориентирования асимметричных деталей различной формы.

Коэффициент  $\eta_{\max}$ , представляющий собой произведение вероятности  $p_i$  (расположение детали по направлению к карману в благоприятном для захвата положении) и вероятности  $p_c$  (отсутствие помех от взаимосцепляемости деталей), должен определяться в следующей последовательности.



захвата. В связи с этим необходимо, проанализировав конструкцию БЗУ, выявить, какой поверхностью деталь должна упасть на дно бункера и на какой угол повернуться, чтобы оказаться в требуемом для захвата положении.

Схемы асимметричных деталей с основными геометрическими параметрами и ограничивающими их поверхностями приведены на рис. 2: I, II — основания с наибольшим и наименьшим (или сферический торец) диаметрами, III — боковая цилиндрическая поверхность. Например, в БЗУ с радиально расположенными карманами деталь для захвата должна упасть на поверхность диска только поверхностью III и повернуться к карману из этого положения основанием II. В зубчатых БЗУ для захвата деталь должна упасть или основанием II, из которого не требуется поворот к карману, поскольку деталь в этой плоскости симметрична, или поверхностью III, при нахождении на которой необходим поворот к карману основанием II.



**Рис. 2.** Расчетные схемы определения вероятностей  $p_I$ ,  $p_{II}$ ,  $p_{III}$  для различных асимметричных деталей:

*a* — с торцом в виде усеченного конуса;  
*б* — ступенчатой; *в* — в виде колпачка с плоским основанием; *г* — со сферическим основанием

Таким образом, для определения вероятности  $p_i$  сначала необходимо найти вероятности того, что деталь, засыпанная в бункер транспортным устройством, после падения окажется на вращающемся диске любой своей поверхностью.

Для асимметричных деталей с тремя ограничивающими поверхностями вероятности  $p_I$ ,  $p_{II}$ ,  $p_{III}$  будут характеризовать положение деталей на диске соответственно поверхностями I, II и III и определяться следующим образом.

С помощью расчетной схемы, после ввода заменяющих коэффициентов  $a = d_1/l$ ,  $c = d_2/l$ ,  $b = x_c/l$ ,  $f = l_1/l$  ( $d_1$ ,  $l$ ,  $d_2$ ,  $x_c$ ,  $l_1$  — геометрические параметры деталей, см. рис. 2), получаем выражения для определения следующих углов, соответствующих:

$$\delta_I = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{2b}\right)^2}} \quad (2)$$

— наибольшему основанию детали;

$$\delta_{II} = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{c}{2(1-b)}\right)^2}} \quad \text{или} \quad \delta_{II}^{cf} = 2 \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a}{2(f-b)}\right)^2}} \quad (3)$$

— наименьшему основанию (см. рис. 2, а-в) или сферическому торцу (см. рис. 2, з) детали;

$$\delta_{III} = 180^\circ - 0,5(\delta_I + \delta_{II}) \quad \text{или} \quad \delta_{III} = 180^\circ - 0,5(\delta_I + \delta_{II}^{cf}) \quad (4)$$

— боковой поверхности.

Тогда вероятности расположения деталей на вращающемся диске БЗУ, соответствующие поверхностям I и II, будут определяться по формулам:

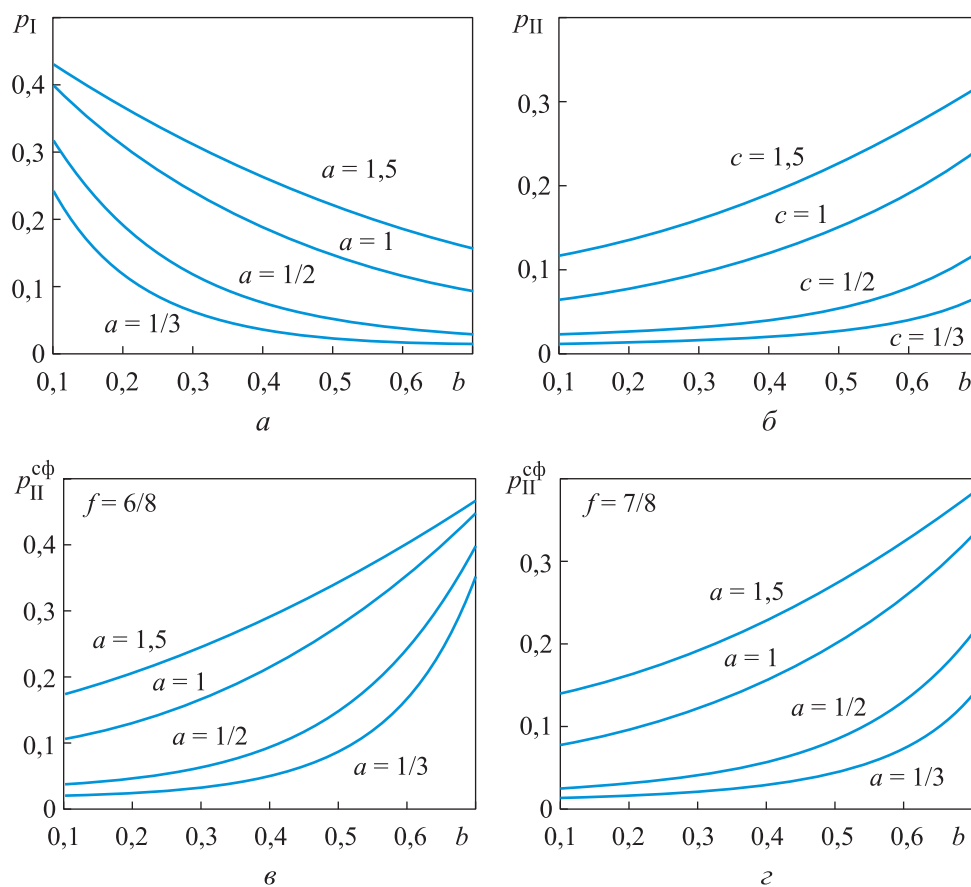
$$p_I = \frac{1 - \cos \frac{\delta_I}{2}}{2}; \quad p_{II} = \frac{1 - \cos \frac{\delta_{II}}{2}}{2}; \quad p_{II}^{cf} = \frac{1 - \cos \frac{\delta_{II}^{cf}}{2}}{2}. \quad (5)$$

Вероятность того, что деталь окажется на поверхности диска боковой поверхностью III, можно записать так:

$$p_{III} = 1 - p_I - p_{II} \quad \text{или} \quad p_{III} = 1 - p_I - p_{II}^{cf}. \quad (6)$$

Зависимости вероятностей  $p_I$ ,  $p_{II}$  и  $p_{II}^{cf}$  от различных соотношений заменяющих коэффициентов  $a$ ,  $c$ ,  $b$  и  $f$  приведены на рис. 3.





**Рис. 3.** Зависимости вероятностей  $p_I$  (а),  $p_{II}$  (б) для деталей всех типов и с торцами разных диаметров и  $p_{II}^{сф}$  для деталей со сферическим торцом от соотношений заменяющих коэффициентов  $f = 6/8$  (в) и  $f = 7/8$  (г)

После выявления поверхностей деталей, с которых возможен их захват, и соответствующих этим поверхностям вероятностей  $p$  по выражениям (2)–(6), необходимо определить, для какой из этих поверхностей требуется поворот детали к карману для обеспечения захвата. При этом каждой выявленной поверхности детали соответствует проведенный к ней из центра масс угол  $\delta$ , который можно найти из (2)–(4) (см. рис. 2).

Определив благоприятные для захвата положения детали, соответствующие этим положениям поверхности и, если необходимо, параметры поворота детали к карману, переходим к определению максимального значения вероятности  $p_i$  (вероятности  $p_{i \max}$ ), соответствующего участкам зоны захвата, на которых детали располагаются разрозненно в один слой.



Выражения для определения вероятности  $p_{i \max}$  для некоторых типов механических дисковых БЗУ с учетом коэффициента трения  $\mu$  деталей об элементы БЗУ и угла наклона  $\alpha$  его бункера для двух способов ориентирования приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Формулы расчета вероятности  $p_{i \max}$  для механических дисковых БЗУ  
и двух способов ориентирования деталей**

Тип БЗУ	Формула расчета вероятности $p_{i \max}$	
	Пассивное ориентирование	Активное ориентирование
Зубчатое	$p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$	$p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right) +$
Вертикальное	$p_I + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$	$+ p_I + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_I - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$
С радиальными карманами	$\frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$	$\frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right) +$ $+ \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_I - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$
С тангенциальными карманами	$\frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{III} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$	$\frac{p_{III}}{\pi} \left( \delta_{III} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$

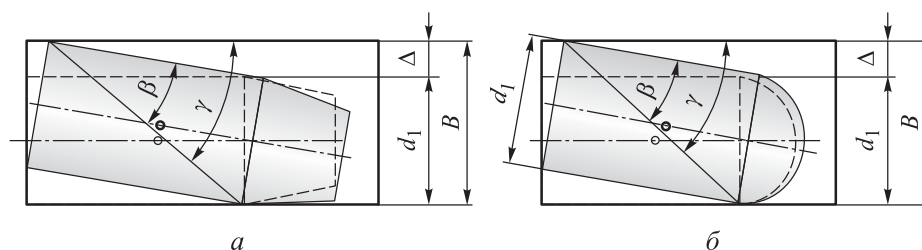
Например, в вертикальном БЗУ с пассивным ориентированием захват возможен в положении детали на основании I (разворот не требуется) и на цилиндрической поверхности III (разворот требуется), в связи с этим вероятность определяется как  $p_{i \max} = p_I + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right)$ .

Если в вертикальном БЗУ реализовано активное ориентирование деталей, а именно захват возможен в положении детали на основаниях I и II, из которых не требуется разворота, и на цилиндрической поверхности III, требующей разворота к каждому основанию, то вероятность определяется по выражению

$$p_{i \max} = p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right) + p_I + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_I - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right).$$

Таким образом, благоприятные для захвата положения деталей определяются их формами и конструктивными особенностями БЗУ. При этом каждая деталь в БЗУ любой конструкции перед захватом должна находиться на его поверхности в требуемом положении и может принять столько положений, сколько поверхностей ограничивают деталь. Не все положения, которые принимает деталь на поверхности бункера, будут благоприятными для захвата. Некоторые из них удобны для захвата, некоторым для захвата требуется разворот на некоторый угол, а в некоторых положениях захват невозможен. Так, при загрузке деталей БЗУ с радиально расположенными карманами и пассивным ориентированием благоприятным для захвата положением будет только нахождение детали на ее цилиндрической поверхности с дальнейшим поворотом в сторону кармана требуемым основанием II. В зубчатом БЗУ с пассивным ориентированием, кроме положения III, захват детали возможен и при нахождении ее в вертикальном положении на основании II.

Далее определяется минимальное значение вероятности  $p_i$  (вероятности  $p_{i \min}$ ), соответствующее участкам зоны захвата, на которых над деталью располагается слой других деталей. Возможность захвата такой детали определяется углами  $\gamma$  и  $\beta$ , расчетные схемы для которых приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Расчетные схемы определения вероятности  $p_{i \min}$  для деталей с различными диаметрами основания на примере торца в виде усеченного конуса (а) и со сферическим торцом (б)

С помощью расчетной схемы получим

$$\gamma = \arcsin \frac{B}{\sqrt{l_1^2 + d_1^2}}; \quad \beta = \arctg \frac{d_1}{l_1}, \quad (7)$$

где  $B = d_1 + \Delta$  — ширина кармана ( $\Delta$  — зазор между деталью и стенкой кармана). Учитывая, что зазор  $\Delta$  при конструировании БЗУ задается как некоторая часть  $\Delta_1$  от диаметра  $d_1$  детали, можно записать  $\Delta = \Delta_1 d_1$ , тогда  $B = (1 + \Delta_1) d_1$ .

Используя рассуждения о положениях, из которых возможен захват детали в БЗУ, и переходах из этих положений в требуемые для захвата детали положения, а также выражения (2)–(7), получаем выражения для определения вероятности  $p_{i \min}$  для основных типов механических дисковых БЗУ (табл. 2).

Таблица 2

**Формулы расчета вероятности  $p_{i \min}$  для механических дисковых БЗУ  
и двух способов ориентирования деталей**

Тип БЗУ	Формула расчета вероятности $p_{i \min}$	
	Пассивное ориентирование	Активное ориентирование
Зубчатое	$p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$	$p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta) + p_I + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$
Вертикальное	$p_I + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$	$p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta) + p_I + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$
С радиальными карманами	$\frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$	$\frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta) + \frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$
С тангенциальными карманами	$\frac{p_{III}}{2\pi}(\gamma - \beta)$	$\frac{p_{III}}{\pi}(\gamma - \beta)$

Таким образом, приведенные в табл. 1 и 2 формулы для определения вероятностей  $p_{i \max}$  и  $p_{i \min}$  получены для всех наиболее часто встречающихся случаев западания деталей в карман с учетом способа их ориентирования.

На следующем этапе определяются зона  $\varphi_3$  захвата деталей и максимальное число  $k$  деталей, которые могут расположиться по окружности в этой зоне. Для определения зоны  $\varphi_3$  захвата требуется составить уравнения статического равновесия детали в кармане при произвольном его расположении и определить угол, при котором возможно движение детали, частично запавшей в паз диска или карман, на необходимую для захвата глубину.

Схема расположения асимметричной детали на поверхности вращающегося диска БЗУ в его радиальном пазу и силы, действующие на деталь, приведены на рис. 5.

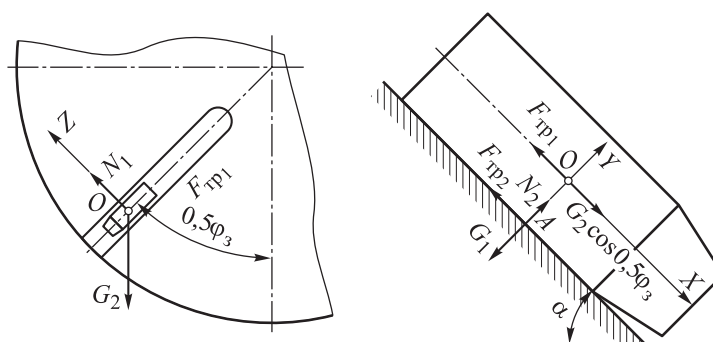


Рис. 5. Расчетная схема для определения зоны захвата деталей

Граничные условия процесса захвата деталей запишем в виде системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \sum F_{OZ} &= -G_2 \cos 0,5\varphi_3 + N_1 = 0; \\ \sum F_{OY} &= N_2 - G_1 = 0; \\ \sum F_{OX} &= -F_{\text{тр}1} - F_{\text{тр}2} + G_2 \cos 0,5\varphi_3 = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $G_2 = G \sin \alpha$  и  $G_1 = mg \cos \alpha$  — составляющие силы тяжести, направленные вдоль кармана и перпендикулярно поверхности диска;  $N_1$  и  $N_2$  — силы реакции, соответствующие силам трения  $F_{\text{тр}1} = N_1\mu$  и  $F_{\text{тр}2} = N_2\mu$ , возникающим при движении детали по боковым стенкам радиального паза и дну.

Выразив из первого и второго уравнений системы (8) силы  $N_1$  и  $N_2$ , подставив их в третье уравнение, выполнив преобразования, запишем выражение

$$-\mu \sin \alpha \sqrt{1 - \cos^2 0,5\varphi_3} - \mu \cos \alpha + \sin \alpha \cos 0,5\varphi_3 = 0,$$

решая которое, получаем

$$\begin{aligned} \arccos \frac{\varphi_3}{2} &= \\ &= \frac{\sin^2 \alpha (1 + \mu^2) + \sqrt{(2\mu \sin \alpha \cos \alpha)^2 - 4 \sin^2 \alpha (1 + \mu^2) (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \mu^2}}{2 \sin^2 \alpha (1 + \mu^2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

В БЗУ, у которых вращающийся диск не имеет радиальных пазов, на деталь не будут действовать боковые силы трения со стороны конструктивных элементов БЗУ, однако будет действовать трение со стороны деталей. Тогда

$$\begin{aligned} & \arccos \frac{\varphi_3}{2} = \\ & = \frac{\sin^2 \alpha (1 + \mu_0^2) + \sqrt{(2\mu \sin \alpha \cos \alpha)^2 - 4 \sin^2 \alpha (1 + \mu_0^2)(\mu^2 \cos^2 \alpha - \mu_0^2 \sin^2 \alpha)}}{2 \sin^2 \alpha (1 + \mu_0^2)}. \end{aligned} \quad (10)$$

После определения  $\varphi_3$  в зависимости от того, как в БЗУ осуществляется захват деталей, находят значение  $k$ :

$$k = \frac{\pi R \varphi_3}{180 d_1} \quad (11)$$

— для БЗУ с захватом деталей радиально расположенными захватывающими органами (БЗУ зубчатое, вертикальное, с радиально расположенными карманами);

$$k = \frac{\pi R \varphi_3}{180 l} \quad (12)$$

— для БЗУ с захватом деталей тангенциально расположенными захватывающими органами, где  $R$  — радиус вращающегося диска БЗУ по осям захватывающих органов.

Далее определяют вероятность

$$p_i = 1 - (1 - p_{i \max})^m (1 - p_{i \min})^k. \quad (13)$$

Например, для БЗУ с радиально расположенными захватывающими органами и активным ориентированием, используя данные табл. 1 и 2, вероятность  $p_i$  можно записать в виде:

$$\begin{aligned} p_i = 1 - & \left[ 1 - \left( \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_{II} - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right) + \frac{p_{III}}{2\pi} \left( \delta_I - 2 \arcsin \frac{\mu}{\alpha} \right) \right) \right]^m \times \\ & \times \left[ 1 - \left( p_{II} + \frac{p_{III}}{2\pi} (\gamma - \beta) + p_I + \frac{p_{III}}{2\pi} (\gamma - \beta) \right) \right]^{\frac{\pi R \varphi_3}{180 l}}. \end{aligned}$$

Для определения вероятности  $p_c$  необходимо знать площадь  $F_i$  каждой образующей поверхности, сумму  $\Sigma F_i$  всех поверхностей детали и возможные варианты сочетаний прилегающих поверхностей при соприкосновении двух деталей.

Соприкосновение асимметричных деталей формы тел вращения, имеющих три образующих поверхности ( $n = 3$ ), может происходить по следующим вариантам сочетаний прилегающих поверхностей ( $n^2 = 9$  вариантов): I-I, I-II, II-II, II-I, I-III, II-III, III-I, III-II, III-III (см. рис. 2).

Каждый вариант характеризуется максимально допустимым углом  $\xi$ , на который можно повернуть две соприкасающиеся детали без их разъединения в плоскостях  $x$  и  $y$ , т. е.  $\xi = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2}$ . Угол  $\xi_i$  характеризует свободу перемещения двух соприкасающихся деталей в каждом варианте сочетаний прилегающих поверхностей, характеризуемых суммой площадей  $(F_1 + F_2)_i$ .

В случае прилегания гладких и ровных поверхностей получаем  $\xi_{xi} = \xi_{yi} = \text{arctg } \mu_0$ , где  $\mu_0$  — коэффициент трения прилегающих поверхностей. При контакте сферических или конических поверхностей с другими поверхностями  $\xi_{xi} = \text{arctg } \mu_0$ ,  $\xi_{yi} = 0$ .

С учетом изложенного, выполнив преобразования, запишем выражение для определения вероятности  $p_c$ , описывающей взаимосцепляемость деталей с любым числом образующих их поверхностей:

$$p_c = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi n \Sigma F_i}} \sum_{i=1}^{n^2} \left[ \left( \sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2} \right) (F_1 + F_2)_i \right]. \quad (14)$$

Для математического описания параметров, входящих в выражение (14), предлагается табл. 3, в которой приведены необходимые формулы для расчета вероятности  $p_c$ .

Таблица 3

**Формулы расчета вероятности  $p_c$  для различных асимметричных деталей формы тел вращения**

Параметр	Тип асимметричной детали					
	С торцами разных диаметров			Со сферическим торцом		
$F_i$	$F_I$	$F_{II}$	$F_{III}$	$F_I$	$F_{II}^{\text{сф}}$	$F_{III}$
	$0,25\pi d_1^2$	$0,25\pi d_2^2$	$\pi d_1 l_1$	$0,25\pi d_1^2$	$2\pi r h$	$\pi d_1 l_1$
$\Sigma F_i$	$0,25\pi(d_1^2 + d_2^2 + 4d_1 l_1)$			$0,25\pi(d_1^2 + 8rh + 4d_1 l_1)$		
$\sqrt{\xi_{xi}^2 + \xi_{yi}^2}$	Варианты сочетаний поверхностей					
	I-I	I-II	II-II	I-I	II-II	I-III
	$\sqrt{2} \text{arctg } \mu_0$			$\sqrt{2} \text{arctg } \mu_0$	0	$\text{arctg } \mu_0$
	II-I	I-III	II-III	II-I	I-II	II-III
	$\sqrt{2} \text{arctg } \mu_0$		$\text{arctg } \mu_0$	$\text{arctg } \mu_0$		
	III-I	III-II	III-III	III-I	III-II	III-III
$\text{arctg } \mu_0$			$\text{arctg } \mu_0$			

Для деталей с торцами разных диаметров и сферическими торцами (у которых  $r = d_1$ ) запишем формулы определения вероятностей:

$$p_c = 1 - \frac{\operatorname{arctg} \mu_0}{3\sqrt{2}\pi(d_1^2 + d_2^2 + 4d_1l_1)} \left[ d_1^2(1,5\sqrt{2} + 1) + d_2^2(1,5\sqrt{2} + 1) + 8d_1l_1 \right];$$

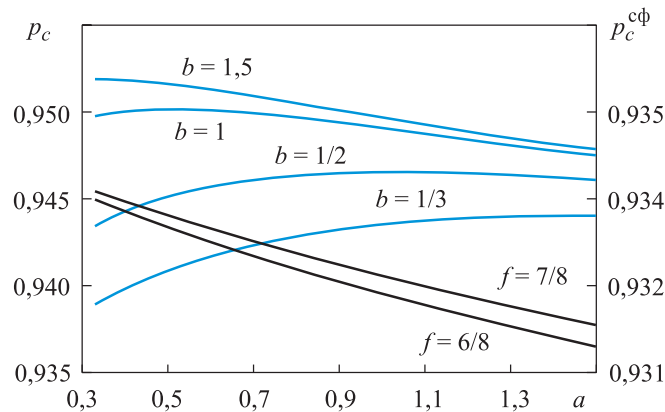
$$p_c^{\text{сф}} = 1 - \frac{\operatorname{arctg} \mu_0}{3\sqrt{2}\pi(d_1^2 + 4rh + 4d_1l_1)} \left[ d_1^2(\sqrt{2} + 2) + 8rh + 12d_1l_1 \right].$$

Используя заменяющие коэффициенты, получаем:

$$p_c = 1 - \frac{[a^2(1,5\sqrt{2} + 1) + c^2(1,5\sqrt{2} + 1) + 8af] \operatorname{arctg} \mu_0}{3\sqrt{2}\pi(a^2 + c^2 + 4af)}; \quad (15)$$

$$p_c^{\text{сф}} = 1 - \frac{[a^2(\sqrt{2} + 2) + 4a(1 - f) + 12af] \operatorname{arctg} \mu_0}{3\sqrt{2}\pi(a^2 + 2a(1 - f) + 4af)}. \quad (16)$$

Зависимости вероятностей  $p_c$  и  $p_c^{\text{сф}}$  для деталей с торцами разных диаметров и сферическим торцом от заменяющих коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $f$  приведены на рис. 6.



**Рис. 6.** Зависимости вероятностей  $p_c$  и  $p_c^{\text{сф}}$  для деталей с торцами разных диаметров и сферическими торцами от заменяющих коэффициентов  $a$ ,  $b$  и  $f$

Полученные выражения для вероятностей  $p_i$  и  $p_c$  позволяют определить коэффициент  $\eta_{\max} = p_i p_c$ .

На следующем этапе находим коэффициент  $\varepsilon$ , характеризующий влияние окружной скорости на захват детали движущимся захватывающим органом.

Основной задачей на данном этапе является получение выражения для определения предельного значения окружной скорости  $U_{\text{пред}}$  захва-



тывающих органов, при которой деталь, находящаяся на поверхности вращающегося диска БЗУ, не успеет запасть в карман на требуемую для захвата глубину  $\Delta h$ .

Решение поставленной задачи основано на гипотезе, заключающейся в том, что вероятность захвата детали равна нулю, когда сообщенная детали движущимся карманом кинетическая энергия достаточна для ее выброса из кармана на некоторую высоту, определяемую конструкцией БЗУ [15].

Расчетные схемы для определения  $v_{\text{пред}}$  основных типов БЗУ в зависимости от способа западания детали приведены на рис. 7.

В зубчатом БЗУ (рис. 7, а) захват деталей обеспечивается их закатыванием с поверхности зубьев на вращающемся диске в его радиально расположенные карманы и состоит из двух этапов: I — начало западания, когда деталь опирается на вершину зуба; II — конец западания, когда деталь соприкасается с гранью  $AB$  зуба, пройдя путь  $s$ , необходимый для ее захвата на глубину  $\Delta h = 0,5d_1$ . Используя принятую гипотезу, запишем

$$v_{\text{пред}} = s \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{d_1}}.$$

Используя расчетную схему и выполняя преобразования, получаем

$$v_{\text{пред}} = \left[ h_3 + d_1 + \Delta - \left( \frac{d_1^2}{2h_3 + 2\sqrt{h_3^2 + d_1^2}} + 0,5h_3 \right) \right] \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{d_1}},$$

где  $h_3$  — толщина зубьев (см. рис. 7, а).

Заменяя  $h_3 = yd_1$  и  $\Delta = \Delta_1 d_1$ , можно записать

$$v_{\text{пред}} = d_1 \left[ 0,5y + 1 + \Delta_1 - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{y + \sqrt{y^2 + 1}} \right) \right] \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{d_1}}. \quad (17)$$

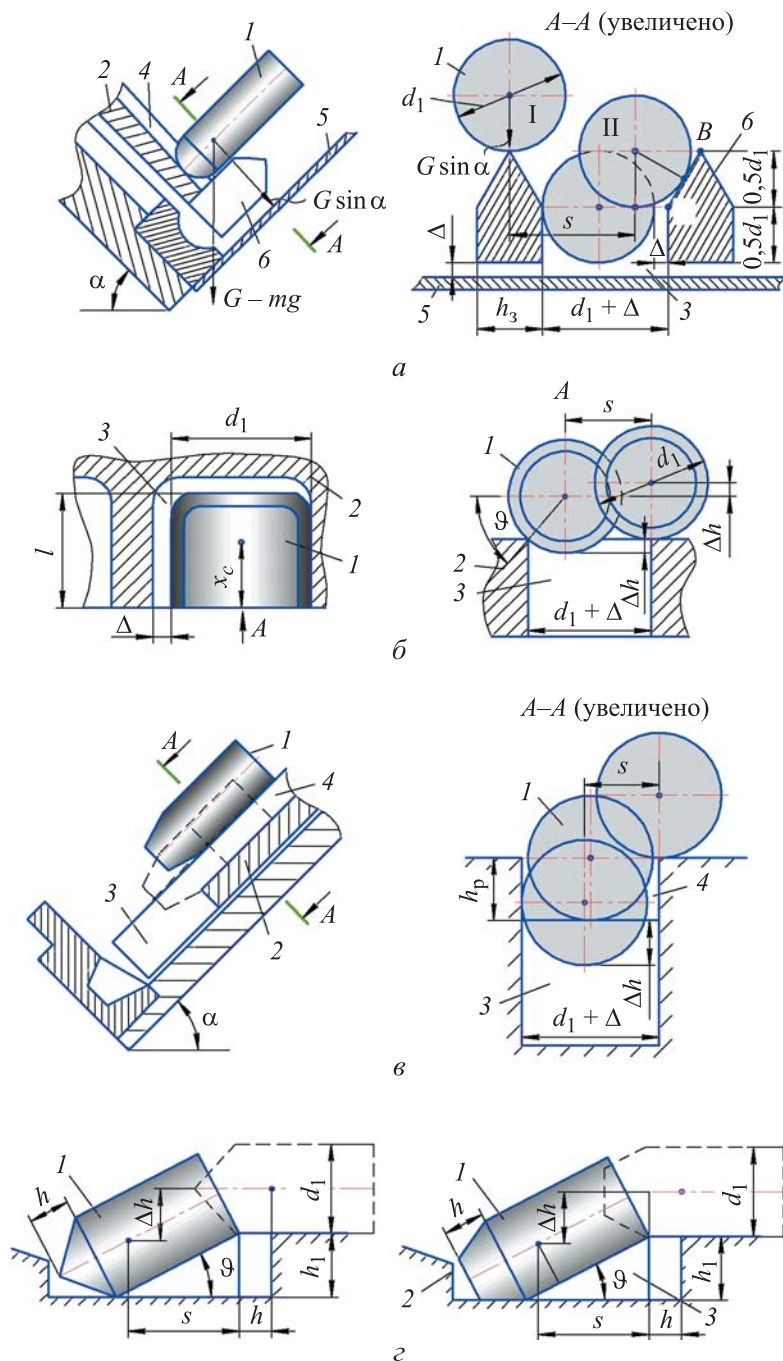
В вертикальном (рис. 7, б) БЗУ захват обеспечивается падением детали, скользящей по неподвижной поверхности, в движущийся карман, при этом центр масс, погружаясь на глубину  $\Delta h$ , проходит путь  $s$ .

Используя принятую гипотезу, запишем

$$v_{\text{пред}} = \sqrt{2g\Delta h}.$$

Пользуясь расчетной схемой, заменяя  $\Delta = \Delta_1 d_1$  и выполняя преобразования, получаем

$$v_{\text{пред}} = \sqrt{0,2gd_1 \left[ 4\Delta_1 + 5 + \sqrt{5 - 4\Delta_1^2} \right]}. \quad (18)$$



**Рис. 7.** Расчетные схемы определения  $v_{\text{перед}}$  для разных схем захвата деталей соответственно в зубчатом, вертикальном, с радиально и тангенциально расположенными карманами БЗУ (а-г):

1 — деталь; 2 — вращающийся диск; 3 — карман; 4 — радиальный паз;  
5 — обечайка; 6 — зубья

В БЗУ с радиально расположенными карманами (рис. 7, в) деталь, находящаяся на вращающемся диске, западает сначала в радиальный паз, а затем в карман, поэтому вероятность захвата детали равна нулю, когда кинетическая энергия, сообщаемая детали, достаточна для ее выброса из кармана на высоту  $\Delta h + h_p$ , т. е.

$$v_{\text{пред}} = \sqrt{2g(\Delta h + h_p)},$$

где  $h_p$  — высота радиального паза вращающегося диска.

Используя расчетную схему, заменяя  $\Delta = \Delta_1 d_1$  и  $h_p = x d_1$ , после преобразований получаем

$$v_{\text{пред}} = \sqrt{d_1 g \left( 1 + 0,4x + 0,8\Delta_1 - 0,2\sqrt{5 - 4(\Delta_1 - 2x)^2} \right)}. \quad (19)$$

Для определения  $v_{\text{пред}}$  в БЗУ, в которых деталь закатывается с неподвижной поверхности в движущиеся тангенциально расположенные карманы (рис. 7, г), примем условие, что деталь начинает западать в карман при частичном отрыве от стенок и отсутствии трения. Тогда

$$v_{\text{пред}} = (s + h) \sqrt{\frac{g}{2\Delta h}},$$

где  $s$  — путь, который проходит центр масс детали, погружаясь в карман на глубину  $\Delta h$ .

Пользуясь расчетной схемой и выполняя преобразования, получаем

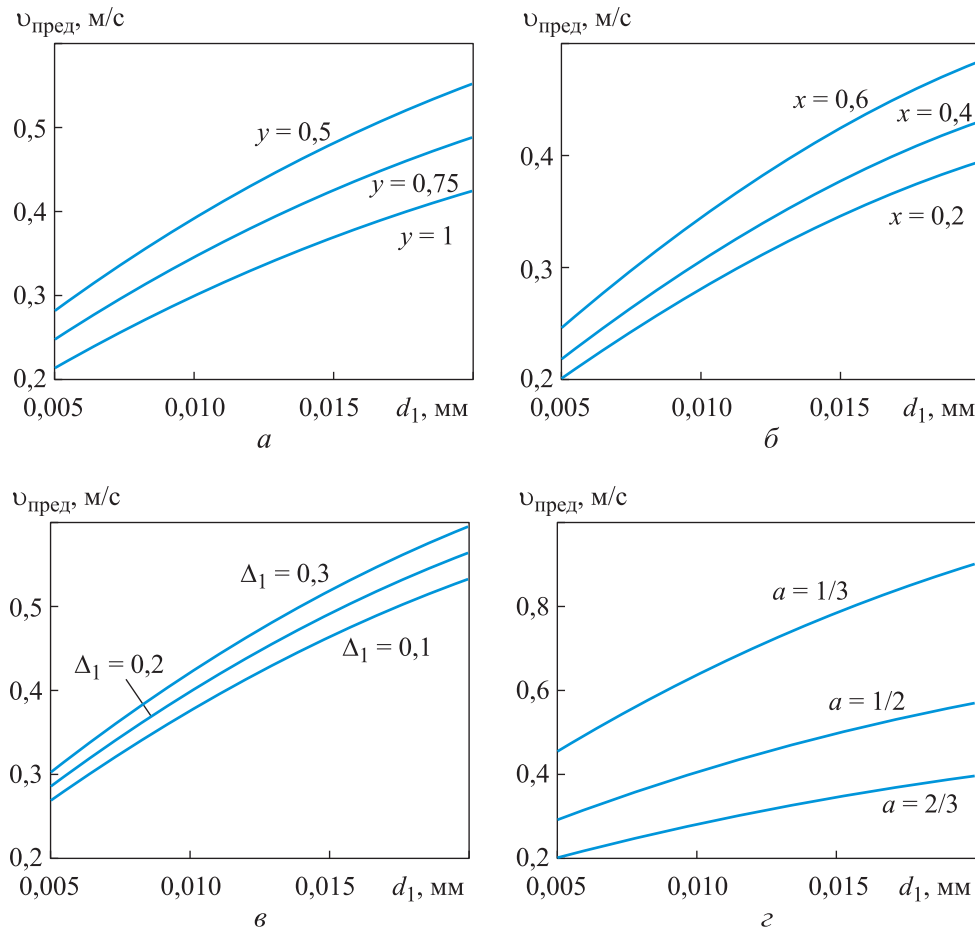
$$v_{\text{пред}} = \left( \frac{0,5d_1}{\sin \vartheta} + (x_c - 0,5d_1 \text{ctg} \vartheta) \cos \vartheta + h \right) \sqrt{\frac{g}{d_1 + 2(x_c - 0,5d_1 \text{ctg} \vartheta) \sin \vartheta}},$$

где  $\vartheta = \arcsin \frac{h_1}{l_1}$  — угол наклона располагаемой детали в кармане;  $h_1$  — высота кармана.

Воспользовавшись заменяющими коэффициентами, принимая  $k_1 = h_1/d_1$  и выполняя преобразования, получаем

$$v_{\text{пред}} = d_1 \left[ \sqrt{\frac{1}{a^2} - k_1^2} - \frac{b}{a} \right] \sqrt{\frac{g}{d_1 \left[ 1 + 2k_1(1 - b) - \sqrt{1 - a^2 k_1^2} \right]}}. \quad (20)$$

Зависимости предельной окружной скорости  $v_{\text{пред}}$  для различных конструкций БЗУ и реализуемых в них способах западания в карман асимметричных деталей от их наибольшего диаметра  $d_1$  приведены на рис. 8.



**Рис. 8.** Зависимости предельной окружной скорости  $v_{\text{пред}}$  асимметричных деталей от наибольшего диаметра  $d_1$  при различных  $y$ ,  $x$ ,  $\Delta_1$ ,  $a$ :

$a$  — западание детали с поверхности выступов;  $б$  — западание в движущийся карман детали, скользящей по неподвижной поверхности;  $в$  — западание детали с поверхности диска в радиальные пазы и карманы ( $\Delta_1 = 0,2$ );  $г$  — западание детали в тангенциально расположенные карманы ( $b = 0,2$ )

Определив окружную скорость  $v_{\text{пред}}$  с помощью одного из выражений (17)–(20) или графически, используя зависимости (см. рис. 8), необходимо вычислить коэффициент  $\varepsilon$  по формуле

$$\varepsilon = v_{\text{пред}}^{-4} \cdot \quad (21)$$

Таким образом, математическая модель для определения вероятности захвата, построенная по предлагаемой методике, описывается выражениями (1)–(21).

**Обсуждение полученных результатов.** Впервые приведенная в настоящей работе методика позволяет построить математическую модель и определить с высокой точностью вероятность захвата деталей формы тел вращения с явной и неявной асимметрией по торцам в различных типах механических дисковых БЗУ со всеми возможными способами захвата и ориентирования деталей.

Построение математической модели и определение вероятности захвата по приведенной методике выполняют в следующей последовательности.

На первом этапе для каждой поверхности рассматриваемой детали определяют соответствующие угол  $\delta$  и вероятность  $p$ . Затем, проанализировав конструкцию и функциональные возможности проектируемого БЗУ, выявляют все благоприятные для захвата детали положения и исключают положения, из которых захват детали невозможен. Это позволит найти вероятности  $p_{i \max}$  и  $p_{i \min}$ . Затем определяют зону  $\varphi_z$  захвата и максимальное число деталей, которые могут разместиться по окружности захватывающих органов в этой зоне, что в совокупности позволит получить выражение для вероятности  $p_i$ , описывающей вероятность нахождения детали по направлению к карману в благоприятном для захвата положении.

На втором этапе вычисляют площади каждой поверхности детали и площади всех поверхностей детали, а затем для каждого сочетания определяют допустимый угол  $\xi$  их поворота без разъединения. Это позволяет получить выражение для определения вероятности  $p_c$ , описывающей взаимосцепляемость деталей при их захвате в БЗУ.

По выражениям для вероятностей  $p_i$  и  $p_c$  вычисляют максимальную вероятность захвата  $\eta_{\max}$ .

На третьем этапе определяют предельную окружную скорость захватывающих органов  $v_{\text{пред}}$  (в зависимости от способа западания детали в карман) и коэффициент  $\varepsilon$ .

Для упрощения вычислений предложены зависимости, позволяющие графически определить вероятности  $p_I$ ,  $p_{II}$ ,  $p_{II}^{\text{сф}}$ ,  $p_c$ ,  $p_c^{\text{сф}}$  и предельную окружную скорость  $v_{\text{пред}}$ , а также приведены выражения для определения вероятностей  $p_{i \max}$  и  $p_{i \min}$  для всех наиболее часто встречающихся случаев западания деталей в карман с учетом способа их ориентирования (см. табл. 1–3).

В результате по предлагаемой методике из выражения (1) определяется вероятность захвата деталей  $\eta$ .

**Заключение.** Разработанная математическая модель определения вероятности захвата деталей позволяет на ранних этапах проектирования оценить производительность механического дискового БЗУ любого типа для деталей формы тел вращения с асимметрией по торцам.

Достоверность изложенных в настоящей работе подходов для определения вероятностных коэффициентов и окружной скорости захватывающих органов подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований, проведенных на макетах как традиционных, так и усовершенствованных механических дисковых БЗУ.

Построенная в соответствии с изложенной методикой математическая модель определения вероятности захвата позволяет учесть влияние на производительность БЗУ размеров его захватывающих и ориентирующих органов, их окружной скорости, геометрических размеров деталей, коэффициента трения как между деталями и конструктивными элементами БЗУ, так и между загружаемыми деталями.

Предложенная методика может быть использована при создании надежных систем автоматической загрузки штучных деталей в оборудование для сборки. Разработка математических моделей определения вероятности захвата на ранних этапах проектирования с высокой для практики точностью позволит оценить максимальные возможности и оптимальные параметры БЗУ для обеспечения требуемых значений производительности оборудования для сборки при загрузке любых асимметричных деталей формы тел вращения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2003, № 10, с. 17–22.
- [2] Надеждин И.В. Загрузочные устройства с вертикальной подачей плоских деталей для автоматизированной сборки. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2007, № 12, с. 26–29.
- [3] Федоров В.А., Калмыков В.В., Малышев Е.Н. Применение крючковых бункерных загрузочно-ориентирующих устройств в многономенклатурном сборочном производстве. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2017, № 10, с. 446–448.
- [4] Васин С.А., Пантюхина Е.В. Основные направления проектирования механических дисковых бункерных загрузочных устройств для асимметричных деталей формы тел вращения. *Вестник РГУПС*, 2023, № 1, с. 8–15.
- [5] Шаумян Г.А. Комплексная автоматизация производственных процессов. М., Машиностроение, 1973.



- [6] Pantyukhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1546, art. 012024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012024>
- [7] Пантюхина Е.В., Прейс В.В. Механические бункерные загрузочные устройства для элементов патронов стрелкового оружия с неявной асимметрией. *Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Тр. XII Общеросс. науч.-практ. конф.* СПб., БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2020, с. 79–85.
- [8] Дьякова Э.В. Современные концепции теорий математического моделирования производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2021, № 4, с. 58–62.
- [9] Пузиков И.В. Трехмерный визуальный анализ производительности вертикального бункерного загрузочного устройства с роликами для ступенчатых трехсоставных колпачков типа push-pull. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2021, № 5, с. 17–21.
- [10] Пантюхина Е.В., Прейс В.В. Математическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с тангенциальными карманами и гребенкой. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2021, № 8, с. 372–378.
- [11] Дьякова Э.В. Сравнительный анализ производительности бункерных загрузочных устройств с профильными карманами и вращающимися роликами. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2020, № 10, с. 450–455.
- [12] Пантюхина Е.В., Прейс В.В. Верификация теоретического подхода к математическому моделированию производительности механических дисковых бункерных загрузочных устройств. *Прогрессивные технологии и системы машиностроения*, 2022, № 1, с. 73–79.
- [13] Дружинина А.В., Прейс В.В. Экспериментальные исследования производительности дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором. *Производительность и надежность технологических систем в машиностроении. Матер. конф.* Тула, Изд-во ТулГУ, 2015, с. 99–104.
- [14] Pantyukhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., et al. 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. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1901, art. 012017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012017>
- [15] Прейс В.Ф., ред. Автоматизация загрузки прессов штучными заготовками. М., Машиностроение, 1975.
- [16] Клаусов И.А., ред. Автоматическая загрузка технологических машин. М., Машиностроение, 1990.
- [17] Grzechca W., ed. Assembly line. Theory and practice. InTech, 2011.
- [18] Boothroyd G. Assembly automation and product design. Boca Raton, CRC Press, 2005.
- [19] Khanna P., Goe A., Goe S. Mathematical analysis of centreboard hopper parts feeder. *Int. J. Adv. Eng. Appl.*, 2010, vol. 3, no. 6, pp. 94–100.
- [20] Медвидь М.В. Автоматические ориентирующие загрузочные устройства и механизмы. М., МАШГИЗ, 1963.



**Васин Сергей Александрович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Городское строительство, архитектура и дизайн» ТулГУ (Российская Федерация, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, д. 92).

**Пантюхина Елена Викторовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» ТулГУ (Российская Федерация, 300012, г. Тула, пр-т Ленина, д. 92).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

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. Сер. Машиностроение*, 2023, № 3 (146), с. 64–88.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-64-88>

**METHOD FOR DETERMINING PROBABILITY  
OF CAPTURING THE ASYMMETRIC PARTS  
WITH THE ROTATION BODY SHAPE IN THE DISK HOPPER  
LOADING-ORIENTATION DEVICES**

S.A. Vasin

vasin\_sa53@mail.ru

E.V. Pantyukhina

e.v.pant@mail.ru

TulSU, Tula, Russian Federation

**Abstract**

Modern equipment in the product assembly should be the automatically loaded reliable systems, where the hopper loading-orientation device is the main component. Recently, there appeared a lot of asymmetric parts, including those with implicit asymmetry. In this connection, it becomes necessary to design such capture devices that are optimal in all the parameters. However, the probabilistic operation principle and the device ability to operate only in capturing a specific part with certain geometric parameters significantly complicate their design and require solution to the complex multi-level tasks. The most important task is to determine its performance, namely the probability of capturing the parts in the hopper loading-orientation device. The paper presents a detailed methodology making it possible to determine the probability of capturing the parts in the bunker loading-orientation devices of various types that implement different methods in capturing

**Keywords**

*Hopper loading-orientation device, part orientation, part capture probability, automatic loading, part loading performance, parts with implicit asymmetry, automatic assembly*

and orienting parts with the revolution body shape of a wide range, both with implicit and explicit asymmetry, for constructing the performance mathematical model. To build a mathematical model of the capture probability, probabilities of finding the part in the favorable position for capturing it with its differing orientations, limiting circumferential speed of the capturing bodies of the hopper loading-orientation device and absence of interference from the interlocking parts were determined. Dependencies are provided that are making it possible to graphically determine the indicated parameters of the mathematical model

Received 08.06.2023

Accepted 27.06.2023

© Author(s), 2023

---

## REFERENCES

- [1] Preys V.V. Reliability of automatic rotary conveyor lines for assembling multi-element products. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2003, no. 10, pp. 17–22 (in Russ.).
- [2] Nadezhdin I.V. Loading devices with vertical submission of flat details for the automated assembly. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2007, no. 12, pp. 26–29 (in Russ.).
- [3] Fedorov V.A., Kalmykov V.V., Malyshev E.N. The use of rotary hook hopper feeder in multiproduct assembly manufacturing. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2017, no. 10, pp. 446–448 (in Russ.).
- [4] Vasin S.A., Pantyukhina E.V. Main directions for design of mechanical disk hopper loading devices for asymmetric parts of rotation bodies shape. *Vestnik RGUPS*, 2023, no. 1, pp. 8–15 (in Russ.).
- [5] Shaumyan G.A. *Kompleksnaya avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov* [Complex automation of production processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.
- [6] Pantyukhina E.V. Integrated approach methodology for evaluating the feed rate of mechanical disk hopper-feeding devices. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1546, art. 012024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1546/1/012024>
- [7] Pantyukhina E.V., Preys V.V. [Mechanical bunker feeding devices for small arms cartridge elements with implicit asymmetry]. *Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsialnogo naznacheniya. Tr. XII Obshcheross. nauch.-prakt. konf.* [Innovative Technologies and Technical Means of Special Purpose. Proc. XII Russ. Sc.-Pract. Conf.]. St. Petersburg, BGTU “VOENMEKh”, 2020, pp. 79–85 (in Russ.).
- [8] Dyakova E.V. Modern concepts of theories of mathematical modeling of performance of mechanical disk hopper-feeder devices. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2021, no. 4, pp. 58–62 (in Russ.).
- [9] Puzikov I.V. Three-dimensional visual performance analysis vertical hopper feeding device with rollers for stepped three-part push-pull caps. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2021, no. 5, pp. 17–21 (in Russ.).

- [10] Pantyukhina E.V., Preys V.V. Mathematical model of the performance of a hopper feeding device with tangential pockets and a comb. *Sbornik v mashinostroyeniye, priborostroyeniye*, 2021, no. 8, pp. 372–378 (in Russ.).
- [11] Dyakova E.V. Comparative analysis of the feed rate of hopper-feeder device with profile pockets and rotating rollers. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2020, no. 10, pp. 450–455 (in Russ.).
- [12] Pantyukhina E.V., Preys V.V. Verification of a theoretical approach to mathematical modeling of the feed rate of mechanical disk hopper feeding devices. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroyeniya*, 2022, no. 1, pp. 73–79 (in Russ.).
- [13] Druzhinina A.V., Preys V.V. [Experimental studies of the feed rate of a circular orientator disk gear hopper]. *Proizvoditelnost i nadezhnost tekhnologicheskikh sistem v mashinostroyeniye. Mater. konf.* [Productivity and Reliability of Technological Systems in Mechanical Engineering. Proc. Conf.]. Tula, Izd-vo TulGU Publ., 2015, c. 99–104 (in Russ.).
- [14] Pantyukhina E.V., Preis V.V., Puzikov I.V., et al. 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. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1901, art. 012017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1901/1/012017>
- [15] Preys V.F., ed. *Avtomatizatsiya zagruzki pressov shtuchnymi zagotovkami* [Automation of press feeding with piece blanks]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1975.
- [16] Klausov I.A., ed. *Avtomaticheskaya zagruzka tekhnologicheskikh mashin* [Automatic feeding of process machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990.
- [17] Grzechca W., ed. *Assembly line. Theory and practice*. InTech, 2011.
- [18] Boothroyd G. *Assembly automation and product design*. Boca Raton, CRC Press, 2005.
- [19] Khanna P., Goe A., Goe S. Mathematical analysis of centreboard hopper parts feeder. *Int. J. Adv. Eng. Appl.*, 2010, vol. 3, no. 6, pp. 94–100.
- [20] Medvid M.V. *Avtomaticheskies orientiruyushchie zagruzochnye ustroystva i mekhanizmy* [Automatic orienting feeding devices and mechanisms]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1963.

**Vasin S.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Urban Construction, Architecture and Design, TulSU (Lenina prospekt 92, Tula, 300012 Russian Federation).

**Pantyukhina E.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Automation and Robotics, TulSU (Lenina prospekt 92, Tula, 300012 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Vasin S.A., Pantyukhina 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, no. 3 (146), pp. 64–88 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-3-64-88>