

УДК 621.867.229.6

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-438-445

## ТЕХНИЧЕСКАЯ ПНЕВМОСИСТЕМА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ С ОПРЕДЕЛЕННЫМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

И.А. Авцинов<sup>a</sup>, Н.В. Суханова<sup>a</sup>, Д.Ю. Маликов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Российская Федерация

<sup>b</sup> ОАО «Газпром газораспределение Воронеж», Воронеж, 394018, Российская Федерация

Адрес для переписки: Suhanovanv1971@mail.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.04.20, принята к печати 16.05.20

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Авцинов И.А., Суханова Н.В., Маликов Д.Ю. Техническая пневмосистема для разработки устройств с определенными функциональными возможностями // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 438–445. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-438-445

### Аннотация

**Предмет исследования.** Разработаны методологические принципы, научные основы распознавания штучных мелких специфических деталей и готовых изделий на тонкой газовой прослойке. Предложенный принцип основан на использовании прослойки в качестве несущего и распознающего основного элемента технической пневмосистемы. В совокупности с конструктивными особенностями рабочих поверхностей устройств обеспечивается создание универсального пневматического оборудования. Разработанное оборудование способно успешно решать задачи контроля, классификации, сортировки, отбраковки и ориентирования предмета производства. Приведено описание принципа распознавания. Рассмотрены характерные элементы технической пневмосистемы. Представлены виды специфических деталей и их классификация, типы рабочих поверхностей и схемы устройств с определенными функциональными возможностями. **Метод.** В работе использованы элементы теории распознавания образов. Предложен новый метод распознавания по обобщенному критерию (удельная нагрузка). Получены два ключа ориентации: площадь опорной поверхности изделия и его масса. Основу предлагаемого класса устройств с определенными функциональными возможностями составила новая техническая пневмосистема вида «пневмокамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие». **Основные результаты.** Показано, что пневматическое оборудование на базе представленной технической пневмосистемы обладает широкими функциональными возможностями: универсальность, многофункциональность, способность манипулирования специфическими изделиями, переналаживаемость при переходе от одних типоразмеров деталей к другим. **Практическая значимость.** Моделирование и кодирование представленной системы является первым шагом для разработки программного продукта с целью автоматизированного конструирования современного пневматического оборудования с определенными функциональными возможностями.

### Ключевые слова

устройство, пневмосистема, газовая прослойка, распознавание, специфические изделия, моделирование, кодирование

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-438-445

## TECHNICAL PNEUMOSYSTEM FOR DEVELOPMENT OF DEVICES WITH CERTAIN FUNCTIONAL CAPABILITIES

I.A. Avtsinov<sup>a</sup>, N.V. Sukhanova<sup>a</sup>, D.Yu. Malikov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation

<sup>b</sup> Open Joint Stock Company Gazprom Gasdistribution Voronezh, Voronezh, 394018, Russian Federation

Corresponding author: Suhanovanv1971@mail.ru

### Article info

Received 01.04.20, accepted 16.05.20

Article in Russian

**For citation:** Avtsinov I.A., Sukhanova N.V., Malikov D.Yu. Technical pneumosystem for development of devices with certain functional capabilities. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 438–445 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-438-445

**Abstract**

**Subject of Research.** The paper deals with the development of methodological principles, scientific basis for the recognition of piece specific small parts and finished production items on a thin gas layer. The proposed principle is based on the use of a layer as a carrier and recognizing main element of the technical pneumatic system. Together with the design features of the working surfaces of devices, the creation of universal pneumatic equipment is provided. The developed equipment is able to solve successfully the following tasks: control, classification, sorting, rejection and orientation of the production item. The principle of recognition is described. Characteristic elements of the technical pneumatic system are considered. Specific parts and their classification, types of work surfaces and device circuits with certain functional capabilities are presented. **Method.** The elements of pattern recognition theory were used. In particular, a new recognition method was proposed by a generalized criterion (specific load). Two orientation keys were obtained (bearing surface area of the product and its mass). A new technical pneumatic system was of the form: “pneumatic chamber–device working surface–thin gas layer–production item”. It formed the basis of the proposed class of devices with certain functional capabilities. **Main Results.** It is shown that pneumatic equipment based on the presented technical pneumatic system has wide functional capabilities: versatility, multifunctionality, the ability to manipulate specific production items, flexibility when switching from one standard size of parts to another. **Practical Relevance.** Modeling and coding of the presented system is the first step for software product development aimed at automated design of modern pneumatic equipment with certain functional capabilities.

**Keywords**

device, pneumatic system, gas layer, recognition, specific production items, modeling, coding

**Введение**

В приборостроении, разработке медицинской техники, химической многоассортиментной промышленности (фармацевтической, парфюмерно-косметической), пищевой и других возникают значительные сложности в манипулировании специфическими деталями и готовой продукцией, например, при сборке изделий, узлов и агрегатов [1–5]. Зачастую это связано со спецификой деталей, к которой можно отнести:

- 1) свойства материала (например, заниженные физико-механические характеристики: хрупкость, ломкость и т. п.);
- 2) особенности опорных поверхностей: высокая чистота обработки, сверхчистые, зеркальные, свеженанесенные покрытия (клеевые, промежуточные, из дорогостоящих материалов, специальные и др.);
- 3) завышенные санитарно-гигиенические нормы на детали и готовые изделия.

Все вышеперечисленное приводит к нецелесообразности использования традиционных средств манипулирования специфическими деталями (например, вибробункеров), где реализуется жесткий фрикционный контакт между парой вида «деталь–рабочая поверхность устройства», приводящий к браку предмета производства.

Разработкой пневматического оборудования занимался ряд исследователей [6], которыми были рассмотрены частные случаи использования газовой смазки для реализации конкретных операций. Наибольшее распространение получили пневматические конвейеры для транспортирования штучной продукции на газовой тонкой прослойке. Однако они не смогли в полной мере решить комплекс задач, необходимых для реализации технологических операций по манипулированию специфическими деталями. В связи с этим разработка оборудования, способного успешно манипулировать специфическими деталями, весьма актуальна. На основании анализа предшествующих разработок [7–10] авторам удалось установить, что для создания устройств, способных качественно манипулировать специфическими штучными деталями, целесообразно

использовать техническую пневмосистему вида «пневмокамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие» («ПРПИ»). Являясь основой оборудования, представленная система позволяет разработать гамму устройств с определенными функциональными возможностями, обеспечивающих реализацию разнообразных операций манипулирования. Постановка задачи данной работы сводится к анализу характерных элементов пневмосистемы «ПРПИ» и синтезу их взаимодействия.

**Принцип функционирования технической пневмосистемы**

Одним из перспективных решений поставленной задачи является разработка устройств (оборудования), использующих в своей работе тонкую газовую прослойку между манипулируемой деталью и рабочей поверхностью оборудования в качестве как несущего, так и распознающего элемента. В основу работы предлагаемых устройств положено функционирование системы вида «ПРПИ». На рис. 1 схематично представлена данная система.

Функционирование системы осуществляется следующим образом. Ленточное полотно 2 полностью перфорированное газоподводящими отверстиями 5 осуществляет перемещение (по стрелке) совместно с

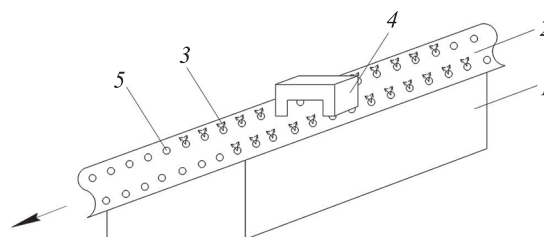


Рис. 1. Схема работы устройства с тонкой газовой прослойкой: 1 — пневмокамера; 2 — рабочая поверхность устройства (например, в виде ленточного полотна); 3 — газовая прослойка; 4 — деталь; 5 — газоподводящие отверстия

деталью 4 и наклонено в горизонтальной плоскости перпендикулярно направлению движения. Попадая в область действия пневмокамеры 1, где создано избыточное давление газа определенного значения, некоторые из деталей «всплывают» на тонкой газовой прослойке 3. Этот процесс характеризуется отсутствием контакта детали 4 и рабочей поверхности 2. Движение ленточного полотна на детали не передается, и они перемещаются независимо от рабочей поверхности 2 в перпендикулярной плоскости движения ленты за счет своей скатывающей составляющей силы тяжести. Не «всплывшие» детали касаются рабочей поверхности 2, и реализуется их совместное движение в направлении, показанном стрелкой. Таким образом, реализуется сортировка (простейший частный случай манипулирования) на два потока. Заметим, что процесс манипулирования включает в себя две стадии:

- 1) происходит распознавание детали;
- 2) придание ей определенной ориентации в пространстве, необходимой для реализации конкретной технологической операции (например, активного ориентирования).

Рассмотрим все элементы технической пневмосистемы «пневмокамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие».

### Элементы технической пневмосистемы

«Изделие» (деталь, узел, агрегат). На предлагаемых устройствах реализуется манипулирование плоскими деталями, т. е. отношение высоты детали к большому размеру развитой опорной поверхности меньше единицы. Кроме того, детали должны быть симметричны относительно своей вертикальной оси и обладать двумя равновероятными положениями нахождения на плоскости. Некоторые из них представлены в табл. 1 и наиболее характерные колпачкового типа на рис. 2 [11].

В основу работы пневматического оборудования положен принцип распознавания объекта манипулирования по обобщенному критерию: удельная нагрузка детали на тонкую газовую прослойку:

$$\lambda = m/S,$$

где  $\lambda$  — удельная нагрузка детали;  $m$  — масса детали;  $S$  — площадь опорной поверхности.

Ключом распознавания может быть как площадь опорной поверхности (развитая большая  $S_1$  или меньшая  $S_2$ ) при постоянной массе детали, так и различная масса при неизменной площади (рис. 3).

Таблица 1. Характерные специфические виды мелких деталей

Эскизы специфических деталей	Наименование (типы деталей)
	Вогнутые, выпуклые линзы
	Защитные стекла приборов осветительной арматуры и т. п.
	Брикеты, стекла, отливки
	Подложка

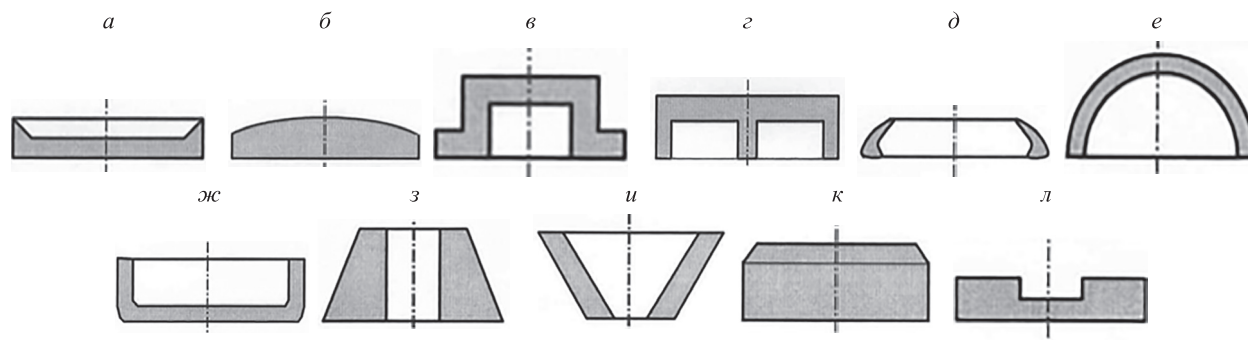


Рис. 2. Виды специфических штучных деталей колпачкового подтипа: вогнутый (а); выпуклый (б); низкий (в); фигурный (г); кольцевой низкий (д); кольцевой высокий (е); чашеобразный (ж); конусный (з); профильный (и); совмещенный (к); таблетированный (л)

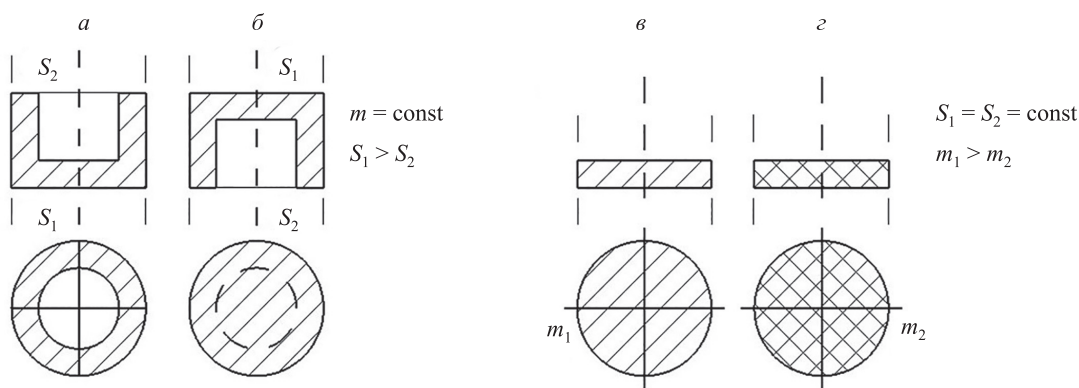


Рис. 3. Размеры и масса некоторых штучных мелких специфических деталей: равновероятные расположения деталей на плоскости с большим (а) и меньшим (б) основаниями; деталь из стали (в) и из пластмассы (z)

Следует отметить, что в результате изготовления деталей может быть нарушена их симметрия относительно вертикальной оси (рис. 4), вызванная скосами (рис. 4, а), внутренними раковинами (рис. 4, б).

Как следствие, кроме асимметрии уменьшается масса деталей, поэтому ключом распознавания (например, при выбраковке) наряду с массой изделия может быть и его асимметрия. На рис. 5 представлена классификация штучных специфических деталей.

«Газовая несущая прослойка». Выполняя функции газовой смазки между поверхностями (опорной детали и рабочего устройства) прослойка полностью



Рис. 4. Бракованные детали: скос (а); внутренняя раковина (пустота) (б)

или частично исключает (снижает) жесткий фрикционный контакт пары. Целесообразность использования пневмооборудования с тонкой газовой прослойкой значительно возрастает для мелких штучных специфических



Рис. 5. Классификационные признаки штучных специфических деталей, где  $D$  — диаметр (ширина);  $h$  — высота;  $m$  — масса;  $S$  — площадь опорной поверхности;  $\lambda$  — удельная нагрузка детали, расположенная меньшей ( $\lambda_1$ ) и большей ( $\lambda_2$ ) опорной поверхностью, на рабочей поверхности устройства

ских деталей различных отраслей промышленности. Кроме газовой смазки, прослойка позволяет реализовать термическую обработку поверхностей деталей, что сокращает время их изготовления. Толщина прослойки меняется от 0 до 3 мм, поэтому в зависимости от класса обработки опорных поверхностей деталей (т. е. величины шероховатости) можно распознавать ее величину [12, 13].

**«Рабочая поверхность устройства».** На тонкой газовой несущей прослойке реализуется операция распознавания детали по площадям опорных поверхностей, качеству обработки, массе и симметричности. Дальнейшее их перемещение для придания определенной ориентации осуществляется на рабочей поверхности устройства (РПУ). РПУ устанавливается на пневмокамеру с возможностью перемещения или неподвижно и полностью перфорирована газоподводящими отверстиями. Газ, истекая из отверстий, под действием избыточного давления в пневмокамере, создает тонкую газовую несущую прослойку между парой «РПУ–деталь». Газоподводящие отверстия выполняются как перпендикулярно рабочей поверхности, так и под наклоном. При этом чувствительность к операции распознавания зависит от их диаметра. С целью экономии газа, подаваемого в пневмокамеру и истекающего из отверстий перфорации РПУ, они могут быть снабжены разнообразными запорными клапанами. Конструкция

РПУ имеет первостепенное значение для определения реализуемой функции на пневмоустройствах и, в первую очередь, зависит от вида операции, требуемой для конкретного технологического процесса. На рис. 6 представлена классификация рабочих поверхностей с характером их движения. Заметим, что скорость перемещения РПУ влияет на быстродействие пневмоустройств [14, 15].

**«Пневмокамера».** Пневмокамера предлагаемых устройств — основание для крепления (расположения) рабочей поверхности и устойчивой установки всей конструкции. В пневмокамере создается определенное избыточное давление газа, истечение которого через перфорацию рабочей поверхности создает тонкую газовую прослойку под опорной поверхностью детали. Величина избыточного давления в пневмокамере определяет операцию «всплытия» (или не «всплытия») объекта манипулирования над РПУ. Конфигурация пневмокамеры зависит от конструкции рабочей поверхности и реализуемой операции. Характерные схемы манипулирования представлены в табл. 2 [16, 17].

В табл. 2 приведены конструктивные особенности рабочих поверхностей (РП), пневмокамер, их движения, код выполняемых операций манипулирования и вид перемещения деталей, где 1 — РПУ; 2 — пневмокамера; 3 — газоподводящие отверстия;  $\omega$  — угловая скорость вращения РПУ;  $\omega'$  — колебательное движе-

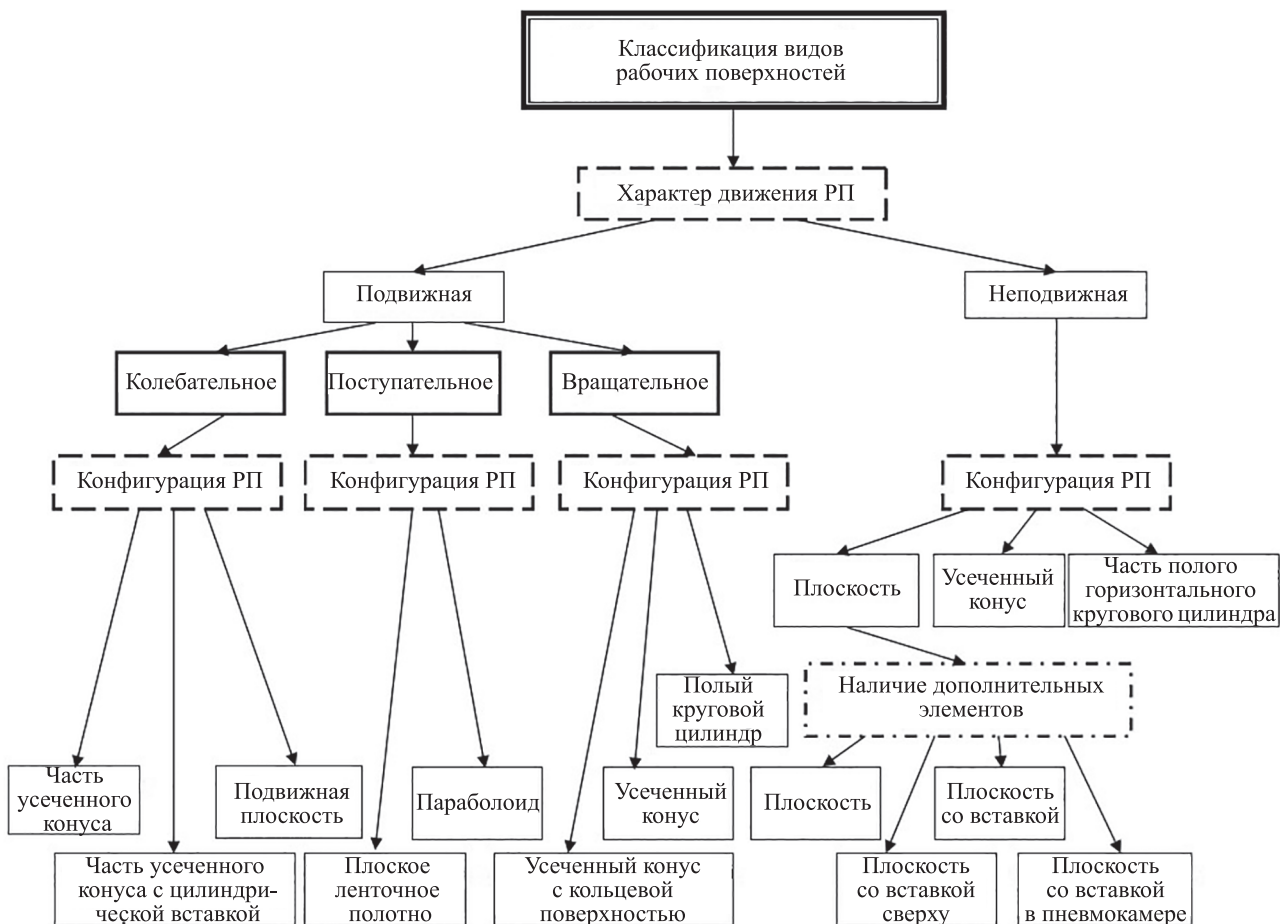
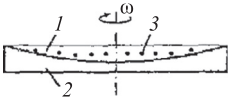
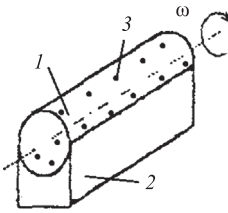
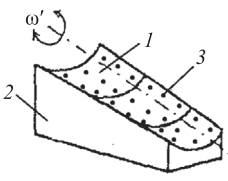
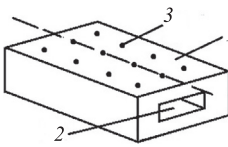
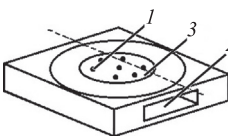
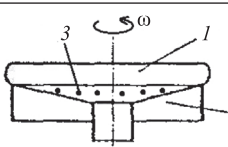


Рис. 6. Виды рабочих поверхностей (РП) и характер их движения

Таблица 2. Типовые системы манипулирования

Схема устройств	Рабочая поверхность устройств		Реализуемые операции	Вид движения детали
	Форма и расположение РП	Движение РПУ		
	Параболоид	Вращательное	ПО, СК, П, ЗОО, ТО, КМ, ККП, В	Поступательное или вращательное спиралевидное
	Цилиндр	Вращательное	ТР, АО, ТО, СК	Поступательное или переворот
	Часть усеченного конуса	Колебательное	АО, ТО, ТР, В, СК	Поступательное
	Жесткая плоскость	Без перемещения	ТР, ПО, ТО, КМ, СК	Поступательное
	Усеченный конус	Без перемещения	КМ, ТР, ТО, Б	Вращательное
	Усеченный конус с кольцевой поверхностью	Вращательное вокруг вертикальной оси	АО, ТО, ТР, Б, ЗОО	Поступательное в горизонтальной и вертикальной плоскостях, переворот

ние РПУ. Кодирование операций манипулирования реализовано следующим образом: ПО — пассивное ориентирование; АО — активное ориентирование; ККП — контроль качества поверхности; ЗОО — загрузка основного оборудования; П — позиционирование; СК — сортировка (классификация); Б — базирование; ТР — транспортировка; ТО — термообработка; КМ — контроль массы; В — выбраковка.

### Результаты и их обсуждение

Синтез вышеописанных основных элементов технической пневмосистемы вида «пнеumoкамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие» показал, что они взаимосвязаны, и в целом, система не может функционировать при отсутствии хотя бы одного из них. На этапе синтеза элементов технической пневмосистемы и их структурной типологизации удалось объединить характерную специфику описанных изделий с конструктивными особенностями устройств и реализуемых на них операций. Основные результаты представлены в табл. 2 [18–20]. Такими

образом, тонкая газовая прослойка является: не только несущим элементом, но и распознающим с чувствительностью, зависящей от диаметра газоподводящих отверстий (при диаметре отверстий перфорации 0,3 мм распознается разность площадей опорных поверхностей (или масс) до 3 % [21–23]); газовой смазкой, позволяющей исключить или снизить жесткий фрикционный контакт трущейся пары «РПУ–предмет производства», что позволяет эффективно использовать предложенные устройства для изделий со специфическими свойствами; хладотеплоагентом, обеспечивающим реализацию на предложенных устройствах разнообразных термических операций.

### Заключение

Таким образом, анализ и синтез характерных элементов пневмосистемы вида «пнеumoкамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие» позволил оценить их взаимосвязь и разработать устройства для выполнения различных манипуляционных операций с определенными функциональными

возможностями. Кроме того, представленные устройства имеют ряд положительных аспектов и обладают следующими преимуществами:

- 1) универсальностью, так как на рабочей поверхности можно манипулировать различными типоразмерами изделий, в результате того, что конструкция рабочей поверхности не зависит от конкретной конфигурации и особенностей (ключей ориентации) предмета производства;
- 2) возможностью манипулирования специфическими изделиями на газовой смазке;
- 3) многофункциональностью, поскольку на каждом из устройств реализуется несколько операций;
- 4) способностью к переналадке при переходе от одних типоразмеров на другие за счет изменения избыточ-

ного давления в пневмокамере и скорости движения рабочей поверхности, что может реализовываться в автоматическом режиме.

Результаты анализа и синтеза элементов технической пневмосистемы «пневмокамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие» позволяют реализовать моделирование и кодирование в целом как системы вида «пневмокамера–рабочая поверхность устройства–тонкая газовая прослойка–изделие», так и взаимосвязь ее компонентов, обеспечивающих автоматизированное проектирование и конструирование современных устройств с определенными функциональными возможностями и техническими характеристиками.

### Литература

1. Авцинов И.А. Загрузочно-ориентирующие устройства для мелких деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 8–10.
2. Битюков В.К., Авцинов И.А., Суханова Н.В. Решение технологических задач манипулирования штучными специфическими изделиями на устройствах с газовой смазкой // Инженерия техники будущего пищевых технологий: материалы международной научно-технической конференции. Воронеж: ВГУИТ, 2018. С. 186–189.
3. Авцинов И.А., Битюков В.К., Суханова Н.В. К вопросу конструирования пневматических устройств для сортировки специфических штучных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 4. С. 172–176.
4. Битюков В.К., Авцинов И.А., Суханова Н.В. Процесс контроля массы штучных изделий на пневматических устройствах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81. № 1(79). С. 138–143. doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-138-143
5. Авцинов И.А., Суханова Н.В. К вопросу конструирования пневматических устройств для сортировки и выбраковки пищевых продуктов // Инновационные технологии в пищевой промышленности: наука, образование и производство: Материалы V международной научно-технической конференции. 2018. С. 155–159.
6. Битюков В.К., Колодежнов В.Н. Гидродинамика и теплоперенос в системах с тонкими несущими слоями вязкой несжимаемой жидкости. Воронеж: ВГУ, 1999. 192 с.
7. Iio S., Hayashi K., Akahane E., Katayama Y., Li X., Kagawa T. Suppression of vortex precession in a non-contact handling device by a circular column // Journal of Flow Control, Measurement & Visualization. 2016. V. 4. N 2. P. 70–78. doi: 10.4236/jfcmv.2016.42007
8. Iio S., Umehachi M., Li X., Kagawa T., Ikeda T. Performance of a non-contact handling device using swirling flow with various gap height // Journal of Visualization. 2010. V. 13. N 4. P. 319–326. doi: 10.1007/s12650-010-0045-y
9. Zhao J., Li X. Effect of supply flow rate on performance of pneumatic non-contact gripper using vortex flow // Experimental Thermal and Fluid Science. 2016. V. 79. P. 91–100. doi: 10.1016/j.exptthermfluidsci.2016.06.020
10. Авцинов И.А., Битюков В.К., Новиков Д.Ю. Устройство для сортировки изделий. Патент РФ №2147942. Бюл. 2000 № 12.
11. Авцинов И.А., Битюков В.К., Маликов Д.Ю. Анализ специфических изделий и конструкций устройств для их манипулирования // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 4(58). С. 73–78. doi: 10.20914/2310-1202-2013-4-73-78
12. Nitta N., Sugimura T., Isozaki A. et al. Intelligent image-activated cell sorting // Cell. 2018. V. 175. N 1. P. 266–276. doi: 10.1016/j.cell.2018.08.028
13. Авцинов И.А., Битюков В.К., Маликов Д.Ю., Ивашин А.Л. Основы структурной типологизации конструирования устройств с газовой несущей прослойкой // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 4(66). С. 53–60. doi: 10.20914/2310-1202-2015-4-53-60

### References

1. Avtsinov I.A. Feeding and ordered orientation devices for small machined parts. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2015, no. 6, pp. 8–10. (in Russian)
2. Bitjukov V.K., Avtsinov I.A., Sukhanova N.V. Solution of technological manipulatory tasks for piece-specific products on gas-lubricated devices. *Future aspects of food technology engineering: Proceedings of Science and Technology Conference*. Voronezh, VSUET, 2018, pp. 186–189. (in Russian)
3. Avcinov I.A., Bitjukov V.K., Sukhanova N.V. To the question of the design of pneumatic devices for sorting specific piece products. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2019, no. 4, pp. 172–176. (in Russian)
4. Bitjukov V.K., Avcinov I.A., Sukhanova N.V. The process of controlling the mass of piece products on pneumatic devices. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2019, vol. 81, no. 1(79), pp. 138–143. (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2019-1-138-143
5. Avtsinov I.A., Sukhanova N.V. To the question of the construction of pneumatic devices for sorting and culling food. *Innovative technologies in food industry: science, education and production. Proceedings of V International Science and Technology Conference*, 2018, pp. 155–159. (in Russian)
6. Bitjukov V.K., Kolodezhnov V.N. *Hydrodynamics and Heat Transfer in Systems with thin Base Layers of Viscous Incompressible Liquid*. Voronezh, Voronezh State University, 1999, 192 p. (in Russian)
7. Iio S., Hayashi K., Akahane E., Katayama Y., Li X., Kagawa T. Suppression of vortex precession in a non-contact handling device by a circular column. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 70–78. doi: 10.4236/jfcmv.2016.42007
8. Iio S., Umehachi M., Li X., Kagawa T., Ikeda T. Performance of a non-contact handling device using swirling flow with various gap height. *Journal of Visualization*, 2010, vol. 13, no. 4, pp. 319–326. doi: 10.1007/s12650-010-0045-y
9. Zhao J., Li X. Effect of supply flow rate on performance of pneumatic non-contact gripper using vortex flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2016, vol. 79, pp. 91–100. doi: 10.1016/j.exptthermfluidsci.2016.06.020
10. Avtsinov I.A., Bitjukov V.K., Novikov D.Ju. *Device for sorting articles*. Patent RU2147942, 2000. (in Russian)
11. Avtsinov I.A., Bitjukov V.K., Malikov D.U. Analysis of specific products and designs devices for their manipulation. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2013, no. 4(58), pp. 73–78. (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2013-4-73-78
12. Nitta N., Sugimura T., Isozaki A. et al. Intelligent image-activated cell sorting. *Cell*, 2018, vol. 175, no. 1, pp. 266–276. doi: 10.1016/j.cell.2018.08.028
13. Avtsinov I.A., Bitjukov V.K., Malikov D.Yu., Ivashin A.L. Fundamentals of structural typology device design with a gas bearing layer. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2015, no. 4(66), pp. 53–60. (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2015-4-53-60

14. Morisawa T., Tsukiji T., Suzuki R. Characteristics of pneumatic non-contact holder with two swirling flows // *Proc. of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM 2017)*, 2017. doi: 10.1115/FEDSM2017-69249
15. Morisawa T., Yano Y., Tsukiji T., Suzuki R. A non-contact holder using airflow // *JFPS International Journal of Fluid Power System*, 2018. V. 11. N 3. P. 104–109. doi: 10.5739/jfpsij.11.104
16. Битюков В.К., Авцинов И.А. Классификация устройств с тонкой газовой несущей-распознающей прослойкой // *Вестник Воронежской государственной технологической академии*. 2005. № 10. С. 58–60.
17. Авцинов И.А., Кристаль М.Г., Маликов Д.Ю. Классификация устройств с газовой несущей прослойкой // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2014. № 2. С. 9–11.
18. Битюков В.К., Авцинов И.А., Суханова Н.В. К вопросу разработки систем управления операций сортировки штучных деталей по массе на пневматических устройствах // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2019. Т. 25. № 4. С. 526–534. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.526-534
19. Братко И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке Prolog. М.: Вильямс, 2004. 637 с.
20. Тишин В.В. Дискретная математика в примерах и задачах: учеб. пособие для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 352 с.
21. Плешаков А.А., Кристаль М.Г. Экспериментальное исследование пневмоэлектронного измерительного устройства для автоматической сортировки деталей перед селективной сборкой // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2016. № 3. С. 23–27.
22. Deza M., Battaglia F. A CFD study of pressure fluctuations to determine fluidization regimes in gas-solid beds // *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 2013. V. 135. N 10. P. 101301. doi: 10.1115/1.4024750
23. Hamdani A., Ihara T., Kikura H. Experimental and numerical visualizations of swirling flow in a vertical pipe // *Journal of Visualization*. 2016. V. 19. N 3. P. 369–382. doi: 10.1007/s12650-015-0340-8
14. Morisawa T., Tsukiji T., Suzuki R. Characteristics of pneumatic non-contact holder with two swirling flows. *Proc. of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM 2017)*, 2017. doi: 10.1115/FEDSM2017-69249
15. Morisawa T., Yano Y., Tsukiji T., Suzuki R. A non-contact holder using airflow. *JFPS International Journal of Fluid Power System*, 2018, vol. 11, no. 3, pp. 104–109. doi: 10.5739/jfpsij.11.104
16. Bityukov V.K., Avtsinov I.A. Classification of devices with a gas supporting-recognizing layer. *Herald of the Voronezh State Technological Academy*, 2005, no. 10, pp. 58–60. (in Russian)
17. Avtsinov I.A., Kristal M.G., Malikov D.Yu. Classification device with a gas carrier layer. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2014, no. 2, pp. 9–11. (in Russian)
18. Bityukov V.K., Avtsinov I.A., Sukhanova N.V. Developing control systems for sorting piece parts by weight on pneumatic devices. *Transactions of TSTU*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 526–534 (in Russian). doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.526-534
19. Bratko I. *Prolog Programming for Artificial Intelligence*. Addison-Wesley, 2011, 673 p.
20. Tishin V.V. *Examples and Exercises of Discrete Mathematics*. Tutorial. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2008, 352 p. (in Russian)
21. Pleshakov A.A., Kristal M.G. Experimental study of pneumo-electronic gauge for parts' automatic sorting prior to selective assembly. *Assembling in mechanical engineering and instrument-making*, 2016, no. 3, pp. 23–27. (in Russian)
22. Deza M., Battaglia F. A CFD study of pressure fluctuations to determine fluidization regimes in gas-solid beds. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2013, vol. 135, no. 10, pp. 101301. doi: 10.1115/1.4024750
23. Hamdani A., Ihara T., Kikura H. Experimental and numerical visualizations of swirling flow in a vertical pipe. *Journal of Visualization*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 369–382. doi: 10.1007/s12650-015-0340-8

#### Авторы

**Авцинов Игорь Алексеевич** — доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Российская Федерация, Scopus ID: 8539425600, ORCID ID: 0000-0002-2528-0905, igor.awtzinov@yandex.ru

**Суханова Наталья Валентиновна** — кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, 394036, Российская Федерация, Scopus ID: 57210445424, ORCID ID: 0000-0002-3210-7879, Suhanovanv1971@mail.ru

**Маликов Денис Юрьевич** — инженер, ОАО «Газпром газораспределение Воронеж», Воронеж, 394018, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0507-5082, levden9@mail.ru

#### Authors

**Igor A. Avtsinov** — D.Sc., Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation, Scopus ID: 8539425600, ORCID ID: 0000-0002-2528-0905, igor.awtzinov@yandex.ru

**Natalia V. Sukhanova** — PhD, Associate Professor, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education “Voronezh State University of Engineering Technologies” (FSBEI HE “VSUET”), Voronezh, 394036, Russian Federation, Scopus ID: 57210445424, ORCID ID: 0000-0002-3210-7879, Suhanovanv1971@mail.ru

**Denis Yu. Malikov** — Engineer, Open Joint Stock Company Gazprom Gasdistribution Voronezh, Voronezh, 394018, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0507-5082, levden9@mail.ru