

**Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Карпенко В. А.**  
**E. B. Shchelkunov, S. V. Vinogradov, M. E. Shchelkunova, V. A. Karpenko**

## **РАБОЧИЙ ЭЛЕМЕНТ МЯГКОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА**

### **WORKING ELEMENT OF THE SOFT GRIPPER**

**Щелкунов Евгений Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ktm@knastu.ru.

**Evgenii B. Shchelkunov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ktm@knastu.ru.

**Виноградов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

**Sergey V. Vinogradov** – PhD in Engineering, Associate Information Security, Information Systems and Physics Department, Amur State University of Humanities and Pedagogy (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sergwin72@rambler.ru.

**Щелкунова Марина Евгеньевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

**Marina E. Shchelkunova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kmopevm@knastu.ru.

**Карпенко Владимир Анатольевич** – студент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

**Vladimir A. Karpenko** – Student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

**Аннотация.** Проведён обзор мягких захватных устройств. Представлена конструкция рабочего элемента, созданного на принципах биомеханики, который может быть использован в конструкции захватных устройств роботов для манипулирования предметами, требующими деликатного обращения. Представлены результаты испытания рабочих параметров рабочего элемента: наибольшее допустимое давление, зависимость угла изгиба рабочего элемента от создаваемого в нём давления и максимальная грузоподъёмность при удержании.

**Summary.** A review of soft gripping devices is carried out. The article presents the design of a working element created on the principles of biomechanics, which can be used in the design of robot gripping devices for manipulating objects requiring delicate handling. The results of testing the working parameters of the working element are presented: the maximum allowable pressure, the dependence of the bending angle of the working element on the pressure generated in it and the maximum carrying capacity during holding.

**Ключевые слова:** робот, мягкая робототехника, захватное устройство, рабочий элемент, пневмопривод.

**Key words:** robot, soft robotics, gripper, working element, pneumatic drive.

УДК 621.865

**Введение.** В настоящее время к средствам автоматизации производственных процессов предъявляются высокие требования по автономности и приспособляемости к изменяющимся условиям. В связи с этим в робототехнике образовалась новая ветвь – мягкая робототехника, осно-

ванная на использовании в приводах роботов принципов биомеханики, имитирующих движения различных живых существ: тело змеи, хобот слона, щупальца осьминога или морской звезды, кисть человека и др.

Достоинствами мягких роботов являются: способность выполнять движения, недоступные традиционным потенциально жёстким роботам; возможность использования альтернативных источников движения; большая безопасность; высокая приспособляемость; простота конструкции; простота обслуживания.

Мягкие роботы находят применение в промышленном производстве, в медицине для выполнения диагностических и оперативных действий, в науке в качестве моделей живых организмов, в военном деле и др.

Для изготовления мягких роботов используют различные эластомеры (силикон, резину, желатин и др.), обладающие высокой эластичностью и прочностью на разрыв [1].

Различают полностью мягкие роботы и роботы, имеющие в конструкции как мягкие, так и жёсткие элементы (несущая конструкция, элементы управления и др.). Возможно также применение мягких элементов в конструкциях традиционных роботов.

Весьма перспективным является применение принципов биомеханики для создания мягких захватных устройств, устанавливаемых на традиционных потенциально жёстких роботах для манипулирования объектами, требующими деликатного обращения (например, в пищевой промышленности), а также объектами сложной конфигурации, неудобной для захватывания жёсткими захватными устройствами, такими как клещи, тиски и др.

В работе проведён обзор мягких захватных устройств, представлены конструкция и результаты испытания разработанного рабочего элемента (РЭ) мягкого захватного устройства робота.

**Обзор мягких захватных устройств.** Анализ литературных источников [2–14] позволил выявить следующие признаки существующих и концептуальных конструкций мягких захватных устройств:

1. Жёсткость:

- полностью мягкое захватное устройство [2; 3];
- мягкие исполнительные органы захватного устройства расположены на жёсткой основе [4];
- жёсткие элементы интегрированы в мягкую оболочку захватного устройства [5].

2. Количество исполнительных органов:

- один [6];
- несколько (два, три и более) [4; 7].

3. Количество степеней свободы:

- одна [7];
- несколько [6].

4. Форма РЭ захватного устройства:

- в виде пальца [7];
- в виде щупальца [6; 8; 9; 10];
- в виде купола [5; 11].

5. Расположение нескольких РЭ захватного устройства:

- лучами (в виде звезды с тремя, четырьмя и более лучами) [4; 12; 13];
- зеркально-симметрично [4];
- в виде антропоморфной руки [14].

6. Способ захвата объекта:

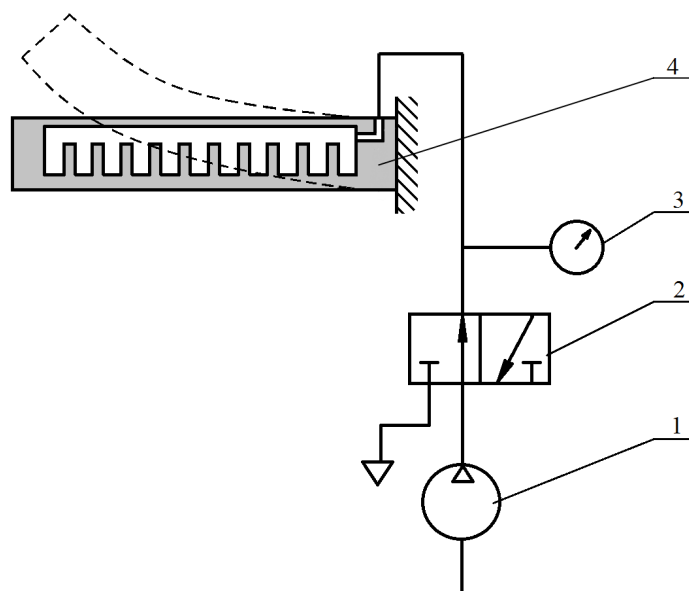
- обхватывание несколькими РЭ одновременно [7];
- обхватывание одним РЭ, имеющим форму купола [5; 11];
- обхватывание одним РЭ, имеющим форму щупальца [6; 8; 9; 10].

Как правило, для мягких захватных устройств используют пневматический привод. Рабочее усилие может создаваться при нагнетании воздуха в тело РЭ захватного устройства [7] либо при откачивании воздуха [5].

**Разработка конструкции.** Для проектируемого рабочего элемента захватного устройства выбраны следующие признаки:

- жёсткость – полностью мягкий;
- количество степеней свободы – одна;
- вид применяемого привода – пневматический.

Пневматическая схема (см. рис. 1) включает пневмонасос 1, клапан 2, манометр 3 и РЭ 4.



1 – пневмонасос; 2 – клапан; 3 – манометр; 4 – рабочий элемент  
Рис. 1. Пневматическая схема РЭ захватного устройства

Пневмонасос 1 служит для нагнетания воздуха в полость РЭ 4, имеющего одну степень свободы, через клапан 2. Под действием сжатого воздуха РЭ 4 изгибается и захватывает объект манипулирования. Давление в полости контролируется с помощью манометра 3, при необходимости снижение давления осуществляется с помощью клапана 2, через который воздух выпускается в атмосферу.

В качестве материала РЭ выбран двухкомпонентный силикон Artline Silicone Rubber Platinum, обладающий большой эластичностью и прочностью (см. табл. 1).

Таблица 1

Характеристика материала Artline Silicone Rubber Platinum

Параметр	Значение
Основа	Платина
Цвет	Полупрозрачный
Вязкость по Брукфильду при 25 °С, сП	250
Диапазон температур, °С	от -50 до +250
Полное отверждение при 23 °С, ч	16

На рис. 2 показано устройство РЭ, представляющего собой герметичную камеру, состоящую из корпуса 1, разделённого перегородками 2 на отсеки, соединённые между собой каналом, верхней стенки 3 и патрубком 5. Верхняя стенка 3 гладкая, армирована льняной тканью 4, что исключает её растяжение при создании давления внутри камеры. Воздух подаётся в камеру через воздушный шланг, подсоединённый к патрубку 5. Под давлением сжатого воздуха эластичные

стенки корпуса 1 вытягиваются, заставляя верхнюю менее эластичную стенку 3 изгибаться. Внешняя поверхность верхней стенки 3 является рабочей.

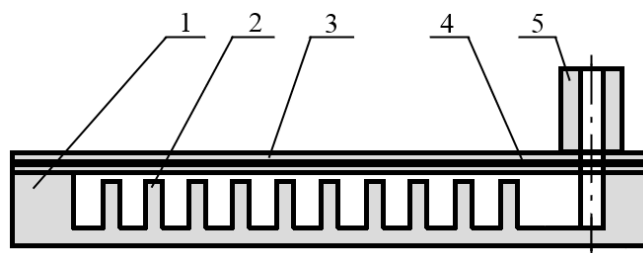


Рис. 2. Устройство РЭ: 1 – корпус; 2 – перегородки; 3 – верхняя стенка; 4 – армирующий слой; 5 – патрубок

При проектировании РЭ использована система автоматизированного проектирования КОМПАС-3D v17 (×64).

На рис. 3 представлены 3D-модели корпуса и верхней стенки рабочего элемента. Воздушные отсеки 1 располагаются в два ряда симметрично относительно центрального воздушного канала 2. Толщина стенок и перегородок составляет 3 мм. Объем и количество камер подобраны так, чтобы обеспечить равномерный плавный изгиб РЭ при создании в нём воздушного давления. Толщина верхней стенки 6 мм.

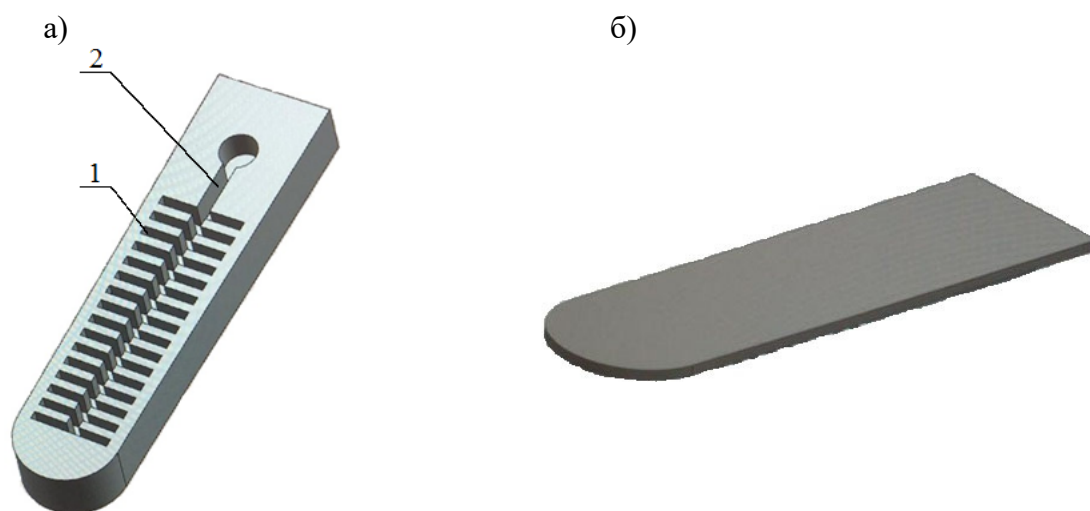


Рис. 3. 3D-модели корпуса (а) и верхней стенки (б) РЭ захватного устройства: 1 – воздушные отсеки; 2 – центральный воздушный канал

**Изготовление опытного образца.** При изготовлении корпуса жидкий силикон заливался в форму, изготовленную методом 3D-печати (см. рис. 4, а). В форме силикон высушивался в течение 16 ч при комнатной температуре. Сборка пальца производилась путём склеивания деталей силиконом. После застывания силикона сборная конструкция для достижения высоких механических свойств выдерживалась в течение 2 ч при температуре 80 °С, а затем ещё 1 ч при температуре 100 °С.

На рис. 4, б, в, г представлены фотографии деталей РЭ, изготовленные из силикона Artline Silicone Rubber Platinum: корпус, верхняя стенка, патрубок.

На рис. 5, а представлена установка для испытания изготовленного РЭ 4 захватного устройства. В качестве системы подачи воздуха и контроля давления выбрана система нагнетания

воздуха медицинского тонометра, состоящая из насоса 1, клапана сброса 2, шлангов 3 и манометра 5 (погрешность измерения  $\pm 3$  мм рт. ст.).

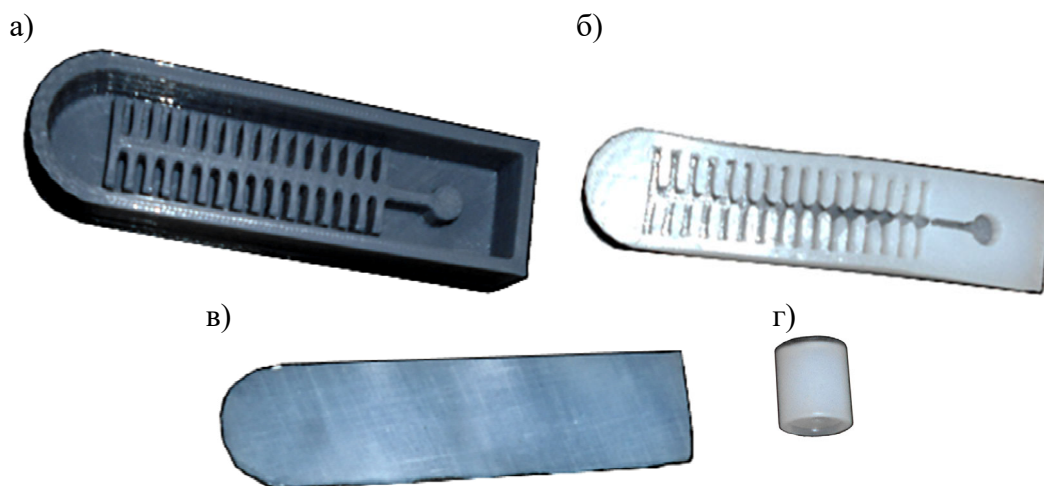


Рис. 4. Форма для отливки и детали РЭ:  
а – форма для отливки; б – корпус РЭ; в – верхняя стенка; г – патрубок

При подаче воздуха от пневмонасоса давление во внутренних отсеках РЭ повышается, вследствие чего он изгибается так, чтобы обеспечить обхват (подхват) и удержание объекта манипулирования (см. рис. 5, б).

**Испытание рабочего элемента.** В процессе испытания определялись наибольшее допускаемое давление, зависимость угла изгиба рабочего элемента от создаваемого в нём давления и максимальная грузоподъёмность при удержании.

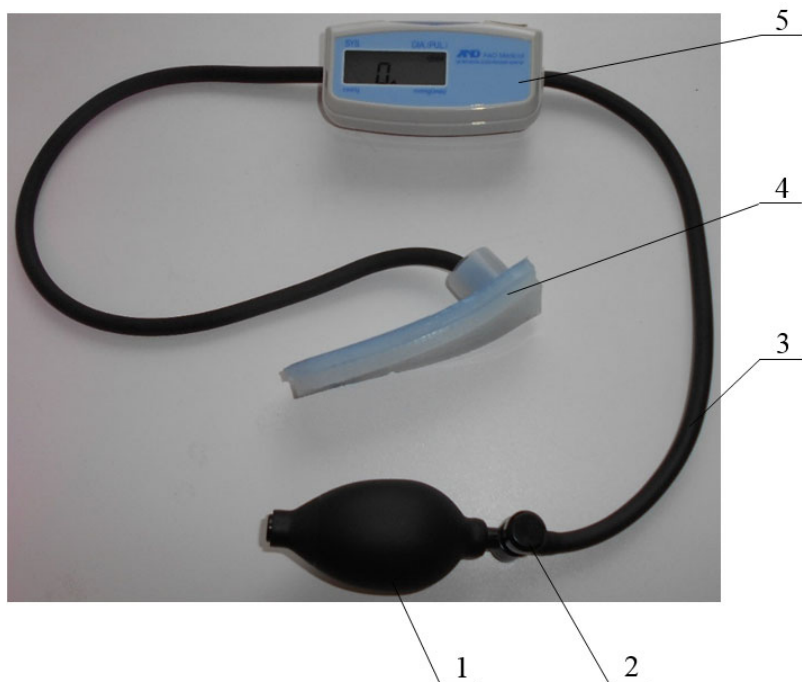
Значение наибольшего допускаемого давления в РЭ принято 170 мм рт. ст. (22,61 кПа). До этого значения наблюдался равномерный изгиб РЭ и равномерное расширение по всей рабочей длине (см. рис. 5, б).

Для определения зависимости угла изгиба рабочего элемента от создаваемого в нём давления в полость РЭ подавался воздух до создания заданного давления, после чего воздушный шланг пережимался для предотвращения стравливания воздуха через штатный клапан сброса системы подачи воздуха. После этого дуга, сформированная рабочей поверхностью РЭ в деформированном состоянии, переносилась на бумагу. Величина изгиба определялась по центральному углу  $\beta$  сектора, формируемого двумя радиусами 2 и 3 и дугой 1, образованной изогнутой рабочей поверхностью (см. рис. 6).

На рис. 7 представлена зависимость угла  $\beta$  изгиба РЭ от создаваемого в нём давления. Видно, что наибольший угол изгиба, соответствующий наибольшему допускаемому давлению, составляет  $120^\circ$ .

Максимальная грузоподъёмность при удержании объектов определялась путём подвешивания на РЭ, изогнутый под давлением 170 мм рт. ст., грузов до тех пор, пока не происходило его разгибание и груз не соскальзывал. Наибольшая масса удерживаемого груза составила 0,410 кг, что в 12 раз превышает вес самого устройства.

а)



б)



Рис. 5. Экспериментальный образец РЭ:

1 – насос; 2 – клапан сброса; 3 – шланг; 4 – рабочий элемент хватного устройства; 5 – манометр

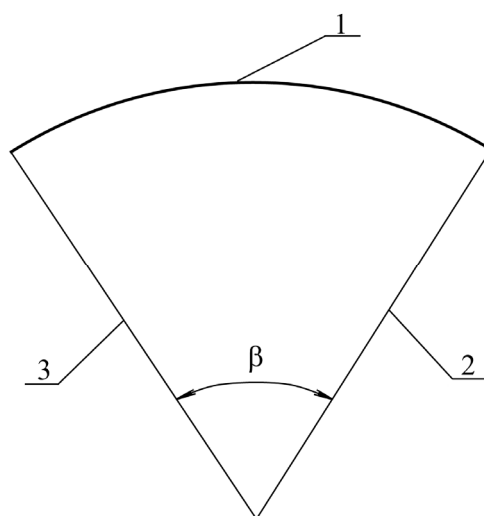


Рис. 6. Схема для определения изгиба РЭ:

1 – изогнутая рабочая поверхность; 2, 3 – радиусы

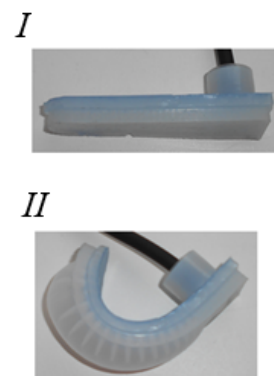
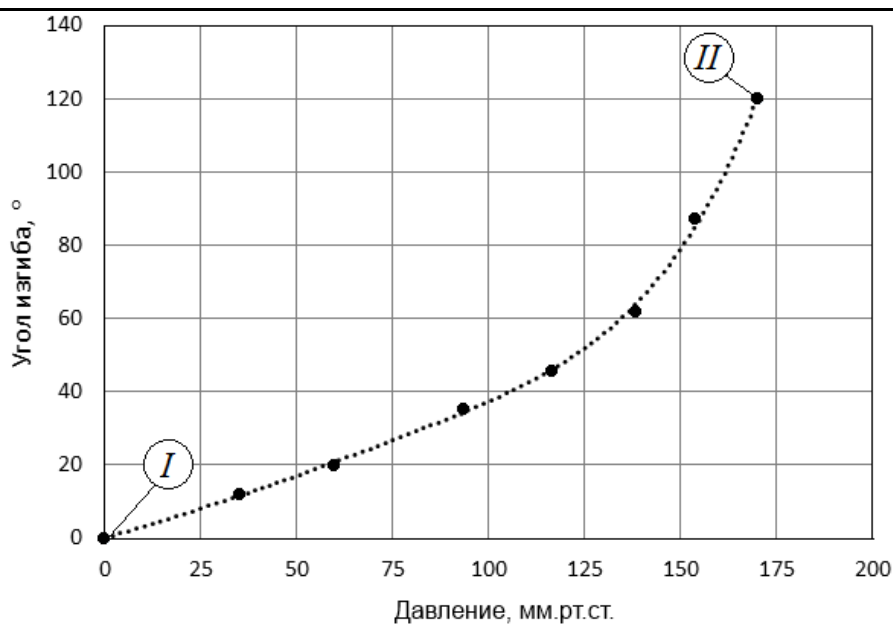


Рис. 7. Зависимость угла изгиба РЭ от давления в нём

По результатам испытания составлена техническая характеристика РЭ (см. табл. 2).

Таблица 2

Техническая характеристика РЭ

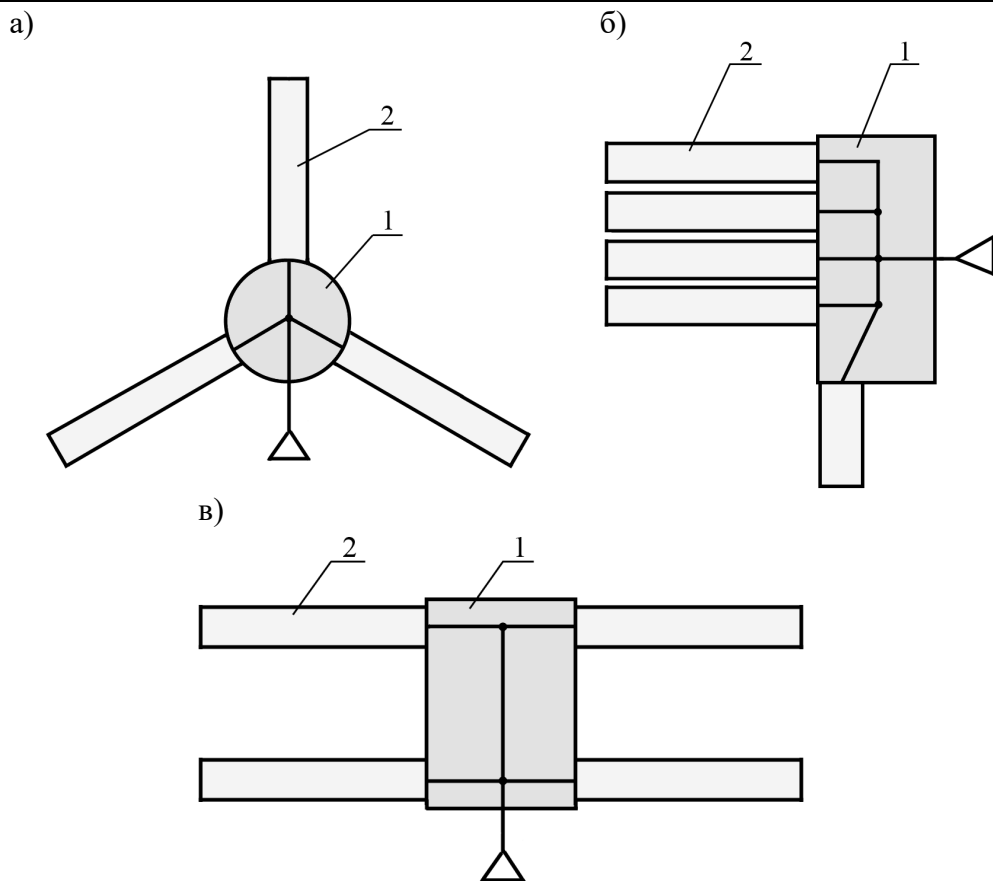
Параметр	Значение
Материал	Artline Silicone Rubber Platinum
Наибольшее допустимое давление, мм рт. ст./кПа	170/22,61
Наибольший угол изгиба, град.	120
Максимальная грузоподъёмность при удержании, кг	0,410
Длина, мм	110
Ширина, мм	30
Высота, мм	38
Масса, кг	0,034

Результаты испытаний показали, что представленный РЭ обладает достаточно высокой грузоподъёмностью и эластичностью и может быть использован в захватных устройствах роботов. На рис. 8 представлены возможные варианты размещения РЭ на корпусе захватного устройства: в виде звезды с тремя лучами; в виде пятипалой антропоморфной руки; в виде устройства с четырьмя пальцами, установленными попарно. Благодаря высокой эластичности РЭ могут адаптироваться (приспосабливаться) к форме и размерам захватываемых предметов.

**Заключение.** В работе проведён обзор мягких захватных устройств роботов.

Представлена разработанная конструкция биомеханического рабочего элемента захватного устройства, изготовленного из силикона на платиновой основе.

Проведено испытание рабочих параметров изготовленного рабочего элемента: наибольшее допускаемое давление, зависимость угла изгиба рабочего элемента от создаваемого в нём давления и максимальная грузоподъёмность при удержании.



1 – корпус захватного устройства; 2 – рабочий элемент

Рис. 8. Варианты размещения рабочих элементов в захватном устройстве:  
 а – в виде звезды с тремя лучами; б – в виде пятипалой антропоморфной руки; в – в виде устройства с четырьмя пальцами, установленными попарно

В результате проведённых испытаний установлено, что рабочий элемент данной конструкции обладает достаточно высокой грузоподъёмностью и эластичностью и, следовательно, может быть использован в захватных устройствах роботов.

Объединение нескольких подобных устройств позволяет создавать (в зависимости от их количества и расположения) захватные устройства в виде звезды, антропоморфной руки и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, М. Р. Определение диаграммы растяжения трубчатого стержня из гиперэластичного материала / М. Р. Петров, А. Н. Петрова, С. Ф. Хакимов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1 (34). – С. 29-34.
2. BioMiC [Электронный ресурс] // Robotics Equipment Corporation. – Режим доступа: <http://servicerobotics.eu/en/biomic/> (дата обращения: 18.10.2020).
3. A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators [Электронный ресурс] / Philipp Rothemund, Alar Ainla, Lee Belding, Daniel J. Preston, Sarah Kurihara, Zhigang Suo, George M. Whitesides. SCIENCE ROBOTICS 21 MAR 2018. – Режим доступа: <https://robotics.sciencemag.org/content/3/16/eaar7986> (дата обращения: 12.01.2021).
4. SoftGripping [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании Soft Gripping. – Берлин, 2020 – . – Режим доступа: <https://soft-gripping.com> (дата обращения: 07.10.2020).
5. Барский, Р. «Аккуратный» робот. Новый мягкий и прочный захватывающий механизм [Электронный ресурс] / Р. Барский // Наука и техника. Роботы и дроны. – 2019. – . – Режим доступа: <https://naukatehnika.com/akkuratnyj-robot.html> (дата обращения 07.10.2020).



6. Hannan M. W., Walker I. D. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots. *J Robot Syst.* 2003 Feb; 20(2):45-63. doi: 10.1002/rob.10070. PMID: 14983840.
7. Shintake J., Sonar H., Piskarev E., Paik J., & Floreano D. (2017). Soft pneumatic gelatin actuator for edible robotics. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 6221-6226.
8. Hoang T. T., Phan P. T., Thai M. T., Lovell N. H., Do T. N., Bio-Inspired Conformable and Helical Soft Fabric Gripper with Variable Stiffness and Touch Sensing. *Adv. Mater. Technol.* 2020, 5, 2000724. – URL: <https://doi.org/10.1002/admt.202000724>.
9. Baumgartner, M., Hartmann, F., Drack, M. et al. Resilient yet entirely degradable gelatin-based biogels for soft robots and electronics. *Nat. Mater.* 19, 1102–1109 (2020). – URL: <https://doi.org/10.1038/s41563-020-0699-3>.
10. Yang, Jingzhou & Peña-Pitarch, Esteban & Potratz, Jason & Beck, Steven & Abdel-Malek, Karim. (2006). Synthesis and analysis of a flexible elephant trunk robot. *Advanced Robotics.* 20. 631-659. 10.1163/156855306777361631.
11. Soft Gripper – Flexible Food-Grade Robot Gripper [Электронный ресурс] / Официальный сайт компании On robot. – URL: <https://onrobot.com/en/products/soft-gripper> (дата обращения: 11.01.2021).
12. Phillips B. T., Becker K. P., Kurumaya S. et al. A Dexterous, Glove-Based Teleoperable Low-Power Soft Robotic Arm for Delicate Deep-Sea Biological Exploration. *Sci Rep* 8, 14779 (2018). – URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33138-y>.
13. Autonomic perspiration in 3D-printed hydrogel actuators. By Anand K. Mishra, Thomas J. Wallin, Wenyang Pan, atricia Xu, Kaiyang Wang, Emmanuel P. Giannelis, Barbara Mazzolai, Robert F. Shepherd *SCIENCE ROBOTICS* 29 JAN 2020.
14. Xiaomin Liu, Yunwei Zhao, Dexu Geng, Shoue Chen, Xiaobo Tan, and Changyong Cao. Soft Humanoid Hands with Large Grasping Force Enabled by Flexible Hybrid Pneumatic Actuators // *Soft Robotics.* – 2020. – Vol. 8. – URL: <http://doi.org/10.1089/soro.2020.0001>.