

СТАРТОВАЯ УСТАНОВКА С КЛИНОВЫМ СПУСКОВЫМ МЕХАНИЗМОМ

Сысоев С.Н., Жулин С.В., Енюхин Е.С.

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир*

Ключевые слова: камерный привод, эластичный механизм, торообразная оболочка, стартовое устройство, пусковая установка, спусковое устройство.

Аннотация. Разработка и создание устройств, работающих на основе физических свойств тороидальных оболочек, заполненных текучей средой, представляет интерес для ученых как в России, так и в других странах. Особенно эффективно использование торообразной камеры в качестве силовой части пусковой установки, предназначенной для запуска объектов различного назначения, в том числе и актуальных сегодня в различных отраслях промышленности беспилотных летательных аппаратов. За приведение в действие стартовой установки с торообразным приводом отвечает специальное спусковое устройство, которое во многом определяет конечную эффективность всей установки. В ходе анализа известных спусковых механизмов, применяемых в составе стартовых устройств с торообразным приводом, выявлены их недостатки, существенно снижающие эффективность работы стартовых установок, что обосновывает необходимость разработки более совершенной спусковой системы. Разработанная система, включающая спусковой механизм в виде штока с клинообразной торцевой поверхностью и разгонную втулку, повышает эффективность работы стартовых устройств. Предлагаемая структура спусковой системы сохраняет простоту конструкции и управления, а также обеспечивает безопасность эксплуатации, предотвращая самопроизвольный запуск объекта.

Работоспособность разработанного устройства подтверждена натурными экспериментами с применением лабораторного стенда.

STARTING DEVICE WITH WEDGE-TYPE RELEASE MECHANISM

Sysoev S.N., Zhulin S.V., Enyukhin E.S.

*Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov,
Vladimir*

Keywords: chamber drive, elastic mechanism, toroidal shell, starting device, launch device, release device.

Abstract. The development and creation of devices based on the physical properties of toroidal shells filled with a fluid medium are of interest to researchers both in Russia and abroad. The use of a toroidal chamber as a power unit of a launcher intended for launching objects of various purposes, including unmanned aerial vehicles which are currently in demand in various industries, is particularly effective. A special release device is responsible for actuating the launcher with a toroidal drive, and this device largely determines the overall efficiency of the entire launcher. An analysis of known release mechanisms used in launchers with a toroidal drive has revealed their disadvantages, which significantly reduce the efficiency of the launchers, thereby justifying the need to develop a more advanced release system. The developed system, which includes a release mechanism in the form of a rod with a wedge-shaped end surface and an acceleration sleeve, improves the efficiency of the launchers. The proposed design of the release system maintains simplicity of construction and operation, while also ensuring operational safety by preventing unintentional launch of the object. The operability of the developed device has been confirmed by full-scale experiments using a laboratory test bench.

Введение

Резкое повышение эффективности работы устройства возможно при изменении принципа его работы. Одним из таких подходов является замещение классических механических звеньев деформируемыми эластичными, в том числе и торообразными оболочками.

Научный интерес к данному направлению прослеживается как в России при создании движителей [1] и силовых частей машин [2], так и за рубежом [3], где наибольшее внимание уделяется применению гибких тороидальных оболочек в робототехнике в качестве исполнительных устройств [4-7].

В качестве силовой части эластичная торообразная оболочка может особо эффективно применяться в конструкции пусковых установок, актуальность разработки которых на сегодняшний день определена применением беспилотных летательных аппаратов во многих сферах промышленности в роли механизма, разгоняющего запускаемый объект.

Принципиально пусковые установки с торообразным разгонным приводом состоят из корпуса, торообразной разгонной камеры и спускового устройства, приводящего торообразную камеру в положение резкого увеличения эффективной площади одного из ее торцов, благодаря чему происходит скоротечный процесс выворачивания оболочки и, как следствие, разгон охватываемого ей объекта. Последние исследования в данной области связаны с разработкой наиболее эффективного спускового устройства.

Спусковые устройства можно разделить на два основных типа: 1) приводящие оболочку в движение за счет активной работы приводных звеньев спускового устройства; 2) приводящие оболочку в движение за счет снятия усилия удержания.

Одной из поздних разработок в рассматриваемой области [8] является стартовое устройство со спусковым механизмом, представляющим собой эластичный рукав, в исходном положении охватывающий наружную поверхность торообразной камеры. Приведение запускаемого объекта в положение, при котором начинается разгон, осуществляется за счет сжатия наружной поверхности торца камеры, противоположного направлению запуска, посредством скручивания рукава за счет активной работы вращательного звена.

Применяемый в данном случае спусковой механизм относится к первому типу и обладает простотой конструктивного исполнения и управления. Однако реализуется только функция выворачивания разгонной камеры и перемещения запускаемого объекта к её торцевой поверхности, отсутствует функция её фиксации и предотвращения самопроизвольного перемещения.

Ко второму типу спусковых устройств относится механизм, применяющийся в составе известной стартовой установки [9] с контейнерной телескопической конструкцией. В данном стартовом устройстве начальное движение оболочки обеспечивается выталкивающей силой со стороны стартовой втулки после снятия фиксатора. Однако спусковой механизм отличается сложностью конструкции, а также низкой эффективностью работы; обусловлено это тем, что элементы спускового устройства постоянно связаны тягой с разгонной оболочкой, увеличивая ее инерционность.

Таким образом, выявленные недостатки существующих спусковых устройств обуславливают необходимость разработки более эффективной спусковой системы.

Материалы и методы исследования

Целью работы является упрощение конструкции спускового устройства и управления им, а также повышение безопасности эксплуатации.

Объектом исследования является спусковая система стартовой установки с торообразным силовым приводом.

Предметом исследования является процесс работы спусковой системы.

Для достижения поставленной цели разработана спусковая система, включающая шток с клиновидным сегментом и разгонную втулку (рис. 1).

В корпусе 1 стартового устройства (рис. 1, а), в котором закреплена торообразная оболочка 2 привода разгонного устройства запускаемого объекта 3, установлена стартовая втулка 4, размещенная в корпусе со стороны, противоположной направлению запуска объекта с возможностью взаимодействия с камерой в исходном положении. Спусковой механизм выполнен в виде штока 5 с торцевой поверхностью клинообразной формы 6, установленный в корпусе с возможностью осевого перемещения.

Перед началом работы в устройство загружают запускаемый объект. К камере подключают пневмолинию с давлением загрузки p_3 для создания и поддержания её торообразной формы.

В исходном положении (рис. 1, б) камера занимает крайнее правое положение, оболочка 2 охватывает запускаемый объект, оказывая на него одинаковое силовое воздействие со всех

сторон. При этом, так как стартовая втулка охватывает правую наружную часть камеры, уменьшая её диаметр, со стороны втулки возникает силовое воздействие $F_{\text{ВТ}}$, способствующее выворачиванию торообразной оболочки в сторону запуска объекта. Одновременно с этим выворачиванию камеры препятствует заклинивающее силовое воздействие от штока $F_{\text{ШТ}}$. В исходном положении перед запуском в камере увеличивают давление, создавая силовое рабочее давление p_1 , что приводит к увеличению силового воздействия её выворачивания, компенсируемого увеличением усилия со стороны штока.

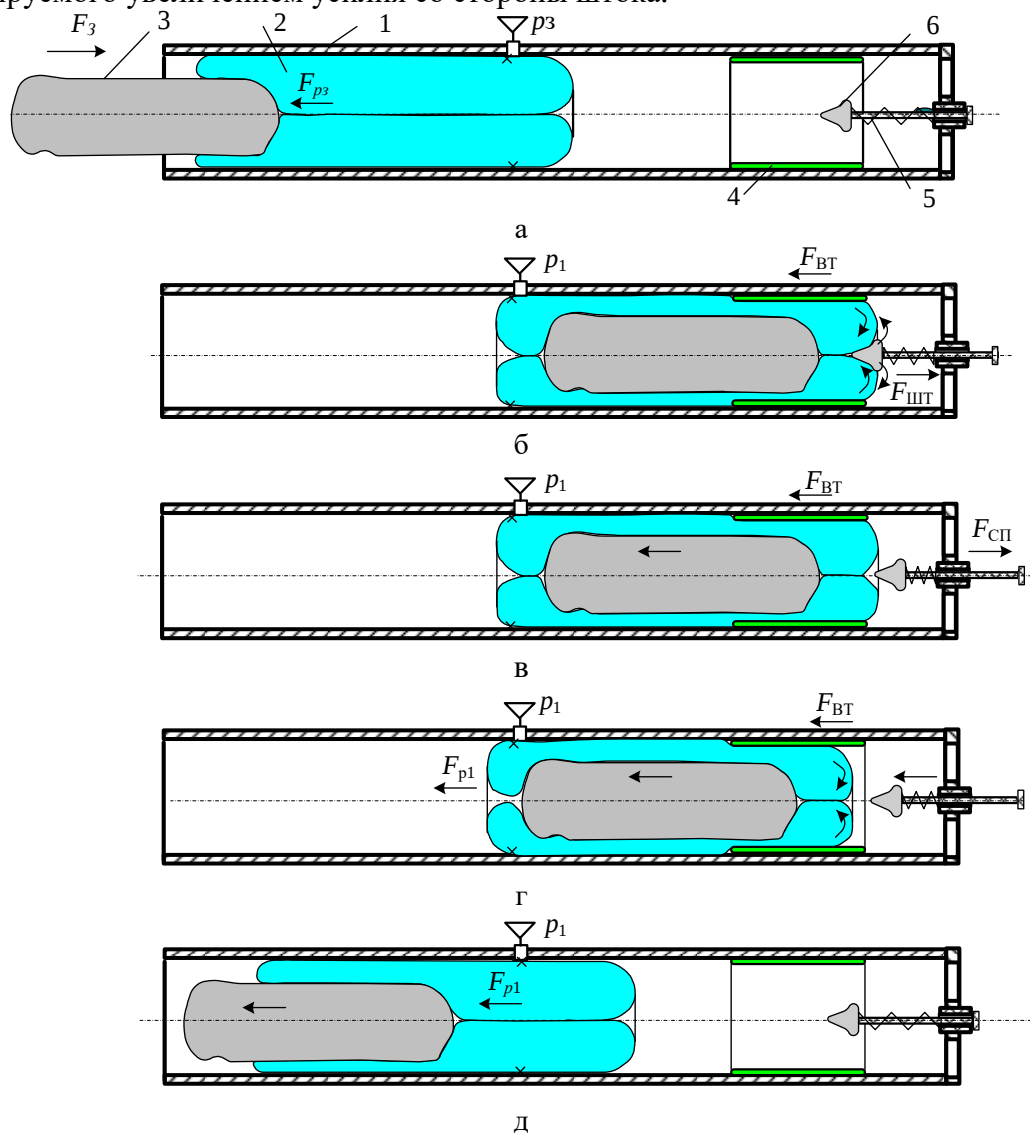


Рис. 1. Этапы работы стартового устройства: а – этап загрузки; б – исходное положение; в, г – стартовый этап; д – этап разгона

Для осуществления запуска объекта 3, шток 5 извлекают из торцевой поверхности разгонной камеры силовым воздействием $F_{\text{сп}}$ вправо (рис. 1, в). Расклинивание камеры приводит к устранению усилия её удержания $F_{\text{ШТ}}$ и перемещению запускаемого объекта относительно камеры в направление запуска.

Дальнейшее перемещение запускаемого объекта влево (рис. 1, г) приводит к началу его выхода из торообразной камеры (рис. 1, д), что увеличивает её эффективную площадь в сторону запуска и разгону тягловым усилием F_{p1} . При этом нет необходимости приведения спускового механизма в исходное положение.

Известно, что силовое воздействие F , действующее на торцевую поверхность торообразной разгонной камеры определяется формулой (1) [10]:

$$F = p \frac{1}{3} \pi (R^2 + Rr + r^2), \quad (1)$$

где p – давление в камере, Па; R – радиус внешнего кольца торцевой поверхности камеры, м; r – радиус внутреннего кольца торцевой поверхности камеры, м.

Для обеспечения надёжной работы клинового спускового механизма необходимо, чтобы в исходном положении усилие, удерживающее оболочку от выворачивания, уравнивало или превышало усилие, стремящееся ее вытолкнуть, т.е. усилие от клина, расширяющего диаметр внутреннего кольца торообразной поверхности должно компенсировать усилие выворачивания от стартовой втулки, сжимающей наружную поверхность торообразной камеры.

Переходя к силам, действующим на торцевые поверхности торообразной разгонной камерой, имеем, что условие работоспособности спусковой системы в исходном положении описывается неравенством (2):

$$F_1 \geq F_2, \quad (2)$$

где F_1 – сила, действующая на торцевую поверхность торообразной камеры со стороны противоположной запуску объекта, Н; F_2 – сила, действующая на торцевую поверхность торообразной камеры со стороны запуска объекта, Н.

Исходя из формулы (1) и неравенства (2), условие работоспособности спусковой системы может быть описано следующим неравенством (3):

$$\sqrt{D_{\text{вт}}^2 + D_{\text{кл}}^2 + D_{\text{вт}} D_{\text{кл}}} \geq D_{\text{к}}, \quad (3)$$

где $D_{\text{вт}}$ – внутренний диаметр разгонной втулки, м; $D_{\text{кл}}$ – диаметр части клина, охватываемой торцевой поверхностью торообразной камеры, м; $D_{\text{к}}$ – внешний диаметр торообразной оболочки (внутренний диаметр корпуса стартового устройства), м.

Полученный геометрический критерий описывает соотношения габаритных размеров стартовой установки и элементов спусковой системы (клиновидной части штока и втулки). Таким образом, в зависимости от габаритных размеров стартового устройства могут быть подобраны размеры элементов спусковой системы.

Вид общий макета спускового механизма (штока), установленного в прозрачном корпусе, приводится на рисунке 2.

Для проверки работоспособности разработанной системы использовался лабораторный стенд (рис. 3).



Рис. 2. Спусковой механизм (общий вид)

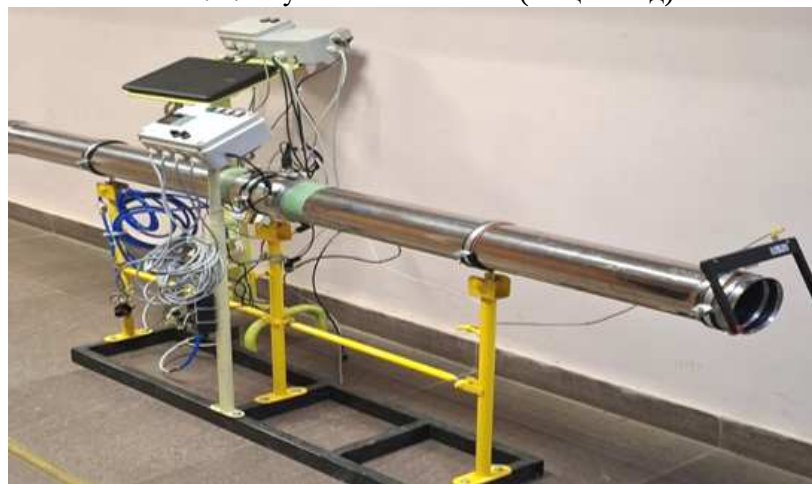


Рис. 3. Макет стартовой установки. Вид общий

Внутренний диаметр корпуса установки – 0,11 м; материал – сталь *AISI 304*. В качестве материала оболочки применялась прорезиненная ткань марки БЦК с толщиной 1 мм. Внутренний диаметр используемой в экспериментах стартовой втулки – 0,104 м; материал клиновой части штока – сталь 45.

Лабораторный стенд, позволяет создавать эффективную площадь торообразной камеры до $\sim 0,0095 \text{ м}^2$.

Результаты

На рисунке 4 изображены полученный по результатам экспериментов и расчетный график зависимости усилия $F_{\text{вт}}$, способствующего движению торообразной оболочки в направлении запуска объекта, со стороны стартовой втулки от давления в разгонной торообразной камере.

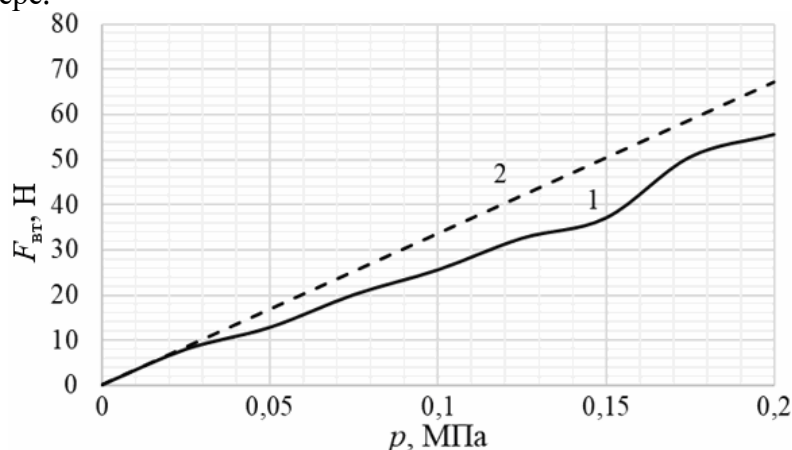


Рис. 4. График зависимости усилия выворачивания торообразной камеры стартовой втулкой $F_{\text{вт}}$ от давления в камере p

Кривая 1 отображает экспериментальные данные; прямая 2 – теоретическую силу выталкивания со стороны стартовой втулки диаметром $D_{\text{вт}} = 0,104 \text{ м}$ на камеру в корпусе с внутренним диаметром $D_{\text{к}} = 0,11 \text{ м}$.

Как видно из графика, обе зависимости носят линейный характер, что подтверждает адекватность теоретической модели в первом приближении. Расхождение расчетных и экспериментальных данных наблюдается ввиду того, что при расчете не учтена сила трения оболочки о поверхность разгонной втулки и корпуса. Для приведения установки в действие величина усилия расклинивания должна превышать сумму усилия выворачивания со стороны разгонной втулки и диссипативных сил (включая силы трения поверхности клина о поверхность камеры).

Установлено, что процесс движения оболочки при использовании разработанной спусковой системы описывается тремя этапами (рис. 5).

Участок 1 на кривой соответствует процессу приложения силы для извлечения клина из зоны обхвата торцевой поверхностью разгонной камеры, сопровождающееся ее выворачиванием в том же направлении. При этом перемещение в обратную сторону небольшое относительно общего хода разгонной оболочки.

Участок 2 описывает перемещение оболочки после выхода клина из зоны контакта с торцевой поверхностью камеры. Поскольку удерживающее усилие со стороны штока исчезло, под воздействием силы со стороны стартовой втулки, которая сжимает наружную поверхность камеры, происходит выворачивание оболочки в направлении запуска с относительно небольшой скоростью.

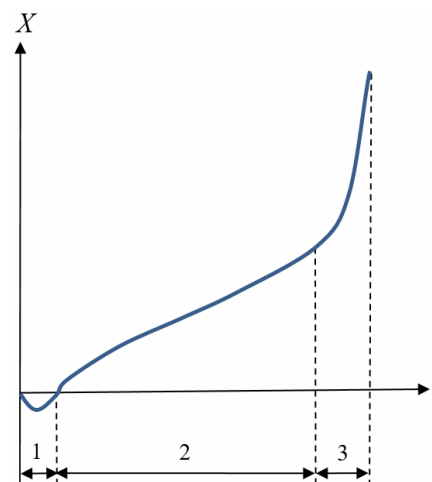


Рис. 5. График этапов движения оболочки

Участок 3 начинается в момент, когда запускаемый объект входит в зону обхвата торцевой поверхностью разгонной камеры. За счёт этого эффективная площадь торца камеры резко увеличивается, что создаёт разгонное тяговое усилие и переводит систему в фазу активного ускорения объекта. Протяжённость данного участка определяется длиной запускаемого объекта.

Экспериментально подтверждено, что решающим условием стабильной работы спусковой системы является выполнение полученного геометрического критерия. При его соблюдении запуск происходит стабильно, а работа стартовой установки становится предсказуемой. Сразу после извлечения клинового элемента штока оболочка начинает движение под действием силы выталкивания со стороны втулки. В случае нарушения этого критерия (при недостаточном диаметре клина) удерживающая способность системы теряется ещё на этапе повышения давления до рабочего, камера самопроизвольно выворачивается без подачи команды на запуск.

Выводы

Получен геометрический критерий работоспособности спусковой системы, связывающий внешний диаметр торообразной оболочки, внутренний диаметр разгонной втулки и диаметр охватываемой камерой части клина, позволяющий целенаправленно выбирать параметры элементов спусковой системы под заданные габариты стартового устройства. Натурные испытания подтвердили стабильную работу устройства при выполнении полученного критерия и самопроизвольный запуск при его нарушении.

Экспериментально установленная линейная зависимость усилия выворачивания торообразной камеры со стороны стартовой втулки от давления в камере согласуется с теоретическими представлениями.

Установлено, что процесс движения оболочки в процессе работы стартового устройства с разработанным спусковым механизмом, включает три характерных этапа: обратное смещение при извлечении клина, выворачивание под действием усилия со стороны стартовой втулки и разгон объекта оболочкой.

Заключение

В ходе анализа известных спусковых устройств, применяемых в составе стартовых установок с торообразным приводом, выявлены их существенные недостатки, что обосновало необходимость разработки более эффективного спускового механизма.

Разработанное спусковое устройство устраняет недостатки существующих аналогов, повышая безопасность эксплуатации, а также упрощает управление, при этом сохраняя простоту конструкции.

Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация формы клиновой поверхности штока с целью снижения необходимого для расклинивания усилия.

Список литературы

1. Давыденко О.В. Повышение эффективности и надежности бестраншейного восстановления трубопроводов с применением торовых приводов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2013. – 19 с.
2. Кольцов В.П., Нгуен В.Х. Функциональные возможности эластичного конического тора // Вестник ИрГТУ. – 2014. – Т. 88, №5. – С. 33-37.
3. Sahu S., Roychowdhury S. Inflation of a toroidal membrane within a fluid-filled elastic spherical enclosure // Thin-Walled Structures. 2025, vol. 207, pp. 112729. doi.org/10.1016/j.tws.2024.112729.
4. Park S., Kim N.G., Seo D., Lee S., Ryu J.H. Bistable Steering Mechanism for Enhanced Control in Soft Toroidal Robots // Soft Robotics. 2026, vol. 13, no. 3, pp. 1-12. doi.org/10.1177/21695172261438632.
5. Zhang H., Wang S., Zhang W., Zong L., Jiang L. A multimode soft gripper with an inflatable toroid for robotic gentle grasping: Swallowing, enveloping, and expansion // Sensors and Actuators A: Physical. 2025, vol. 393, pp. 116797. doi.org/10.1016/j.sna.2025.116797.
6. Root S.E., Preston D.J., Feifke G.O., Wallace H., Alcorn R.M., Nemitz M.P., Tracz J.A., Whitesides G.M. Bio-inspired design of soft mechanisms using a toroidal hydrostat // Cell Reports Physical Science. 2021, vol. 2, no. 9, pp. 100572. doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100572.
7. Sui D., Zhu Y., Zhao S., Wang T., Agrawal S.K., Zhang H., Zhao J. A Bioinspired Soft Swallowing Gripper for Universal Adaptable Grasping // Soft Robotics. 2022, vol. 9, no. 1, pp. 36-56. doi.org/10.1089/soro.2019.0106.

8. Сысоев С.Н., Жулин С.В., Енюхин Е.С. Стартовое устройство с торообразным силовым приводным механизмом // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2025. – №32. – С. 57-62. – doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-116-118.
9. Патент №2771300 РФ. Стартовое устройство / С.Н. Сысоев, Ю.В. Черкасов, А.В. Федин, М.А. Федина. – Заявка 2021125159 от 04.08.2021; опубл. 29.04.2022, Бюл. №13.
10. Патент №2586379 РФ. Способ управления штоком камерного привода / С.Н. Сысоев. – Заявка 2014150959 от 17.12.2014; опубл. 10.06.2016, Бюл. №16.

References

1. Davydenko O.V. Increasing the efficiency and reliability of trenchless pipeline rehabilitation using toroidal drives: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Volgograd, 2013. – 19 p.
2. Koltsov V.P., Nguyen V.H. Functional capabilities of elastic conical torus // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014, vol. 88, no. 5, pp. 33-37.
3. Sahu S., Roychowdhury S. Inflation of a toroidal membrane within a fluid-filled elastic spherical enclosure // Thin-Walled Structures. 2025, vol. 207, pp. 112729. doi.org/10.1016/j.tws.2024.112729.
4. Park S., Kim N.G., Seo D., Lee S., Ryu J.H. Bistable Steering Mechanism for Enhanced Control in Soft Toroidal Robots // Soft Robotics. 2026, vol. 13, no. 3, pp. 1-12. doi.org/10.1177/21695172261438632.
5. Zhang H., Wang S., Zhang W., Zong L., Jiang L. A multimode soft gripper with an inflatable toroid for robotic gentle grasping: Swallowing, enveloping, and expansion // Sensors and Actuators A: Physical. 2025, vol. 393, pp. 116797. doi.org/10.1016/j.sna.2025.116797.
6. Root S.E., Preston D.J., Feifke G.O., Wallace H., Alcorn R.M., Nemitz M.P., Tracz J.A., Whitesides G.M. Bio-inspired design of soft mechanisms using a toroidal hydrostat // Cell Reports Physical Science. 2021, vol. 2, no. 9, pp. 100572. doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100572.
7. Sui D., Zhu Y., Zhao S., Wang T., Agrawal S.K., Zhang H., Zhao J. A Bioinspired Soft Swallowing Gripper for Universal Adaptable Grasping // Soft Robotics. 2022, vol. 9, no. 1, pp. 36-56. doi.org/10.1089/soro.2019.0106.
8. Sysoev S.N., Zhulin S.V., Enyukhin E.S. Starting device with torus-shaped power drive mechanism // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2025, no. 32, pp. 57-62. doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-116-118.
9. Patent No. 2771300 RU. Launch device / S.N. Sysoev, Yu.V. Cherkasov, A.V. Fedin, M.A. Fedina. – Appl. No. 2021125159 from 04.08.2021; publ. 29.04.2022, Bul. No. 13.
10. Patent No. 2586379 RU. Method of controlling movement of rod of chamber drive / S.N. Sysoev. – Appl. No. 2014150959 from 17.12.2014; publ. 10.06.2016, Bul. No. 16.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Сысоев Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация, мехатроника и робототехника»	Sysoev Sergey Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of automation, mechatronics and robotics
Жулин Сергей Васильевич – аспирант	Zhulin Sergey Vasilievich – postgraduate student
Енюхин Евгений Сергеевич – аспирант	Enyukhin Evgeny Sergeevich – postgraduate student
eenyuhin2001@mail.ru	

Получена 10.06.2026