

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОЛЬНОГО МЕХАНИЗМА

В. Н. Китаев¹, Р. Л. Афанасьев^{2,3}, М. В. Петров³

^{1,2,3} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия
^{1,2,3} kb2@vniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработанный накольный механизм относится к устройствам инициирования взрывных устройств, используемых для ликвидации возникающих на реках во время весеннего паводка ледовых заторов, обычно представляющих собой хаотичные нагромождения бесформенных льдин, когда ударные ускорения при встрече с преградой по направлению равновероятны в телесном угле $\Omega = 2\pi$ стерадиан, т.е. в полусфере. *Материалы и методы.* Основная особенность разработанной конструкции накольного механизма, отличающая его от устройств аналогичного назначения, – использование дополнительной магнитной системы, позволяющей повысить скорость перемещения ударника в конце его хода за счет дополнительной ускорения ударника магнитной системой. Кинетическая энергия ударника, затрачиваемая на сжатие цилиндрической пружины, восполняется магнитной системой, обеспечивая надежное задействие капсуля-детонатора. Это дополнительное притяжение не зависит от скорости встречи объекта использования с преградой, следовательно, и от величины возникающего при этом ударного ускорения, поэтому накольный механизм надежно сработает как при больших, так и малых скоростях встречи устройства с преградой. Выполнение инерционного тела в виде шара и установка его между торцевой плоской поверхностью ударника и конической поверхностью корпуса обеспечивает передачу на осевой ударник сил инерции шара как при его осевом, так и боковом перемещении (при наличии соответствующих ударных ускорений). Использование в накольном механизме опоры качения в виде обоймы с размещенными в ней по окружности шариками позволяет исключить трение скольжения инерционного тела (шара) и обеспечить надежное срабатывание накольного механизма при встрече устройства с преградой с малыми скоростями под любыми углами (при ударных ускорениях в любых боковых направлениях). *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного накольного механизма, обеспечивающего надежное срабатывание при встрече с преградой со сложной поверхностью под различными углами и с малыми скоростями.

Ключевые слова: накольный механизм, инерционное тело, надежность срабатывания, пространственная диаграмма срабатывания, математическая модель, дифференциальные уравнения

Для цитирования: Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель накольного механизма // Надежность и качество сложных систем. 2025. № 2. С. 56–62. doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-6

MATHEMATICAL MODEL OF THE PIERCING MECHANISM

V.N. Kitaev¹, R.L. Afanasyev^{2,3}, M.V. Petrov³

^{1,2,3} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Russia
^{1,2,3} kb2@vniitf.ru

Abstract. *Background.* The piercing mechanism (piercer) developed is a device of blast initiation for removing ice obstruction in rivers during spring freshet with chaotic piles of formless blocks of ice, when impact accelerations at barriers contact are equiprobable in the line at a solid angle $\Omega = 2\pi$ steradians, i.e. in a hemisphere. *Materials and methods.* Major feature of developed design of the piercing mechanism to differ it from similar devices is use of magnetic system, increasing the speed of striker acceleration at the end of its travel thanks to additional acceleration of the striker by the magnet system. Kinetic energy of the striker spent for cylinder spring compression is compensated by the magnetic system, enabling reliable initiation of a blasting cap. Such additional attraction depends neither on rate of the contact of the body with obstacle, consequently nor on the value of initiated acceleration, and so the piercing mechanism will snap into action both at high and low rates of the contact with the obstacle. Ball-form of the inertial body as well as its location between flat face of the striker and conic surface of the package provide transfer of the ball inertia to axial striker both at its axial and lateral travel (at presence of appropriate impact accelerations). Use of rolling contact bearing in the form of ball racer eliminates sliding friction of the inertial body (sphere) and guarantee reliable initiation of the piercing mechanism at a contact of the device with an obstacle with low rate at different angle (with impact accelerations at any of side directions). *Results and conclusions.* Submitted work demonstrates possibility of

designing of reliable and technologically effective piercing mechanism for the contact with an obstacle of complex form at different angles, and at low rate.

Keywords: piercing mechanism, inertial body, reliable response, spatial response diagram, mathematical model, differential equation

For citation: Kitaev V.N., Afanasyev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of the piercing mechanism. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2025;(2):56–62. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2025-2-6

Назначение накольного механизма

Разработанный накольный механизм относится к устройствам инициирования взрывных устройств, используемых для ликвидации возникающих на реках во время весеннего паводка ледовых заторов, обычно представляющих собой хаотичные нагромождения бесформенных льдин, когда ударные ускорения при встрече с преградой по направлению равновероятны в телесном угле $\Omega = 2\pi$ стерадиан, т.е. в полусфере.

Техническое решение накольного механизма обеспечило повышение надежности срабатывания при встрече с преградой со сложной поверхностью под различными углами и с малыми скоростями.

Конструкция накольного механизма

Конструкция накольного механизма представлена на рис. 1–5.

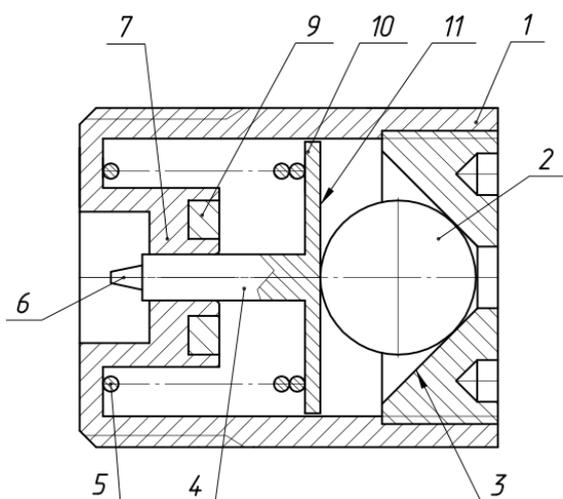


Рис. 1. Накольный механизм в исходном состоянии

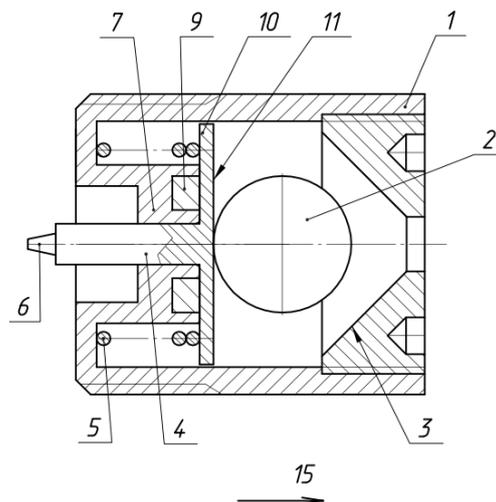


Рис. 2. Накольный механизм при ударном ускорении в осевом направлении

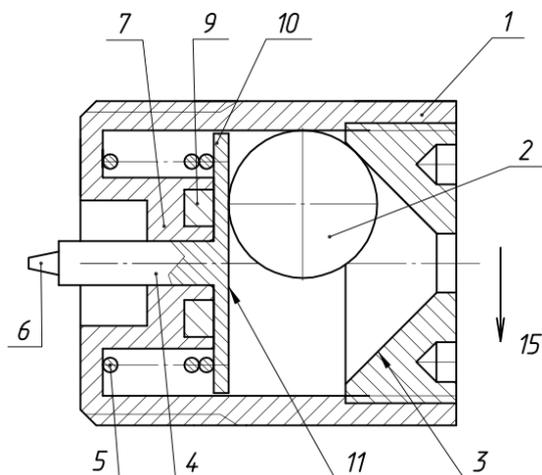


Рис. 3. Накольный механизм при ударном ускорении в поперечном направлении

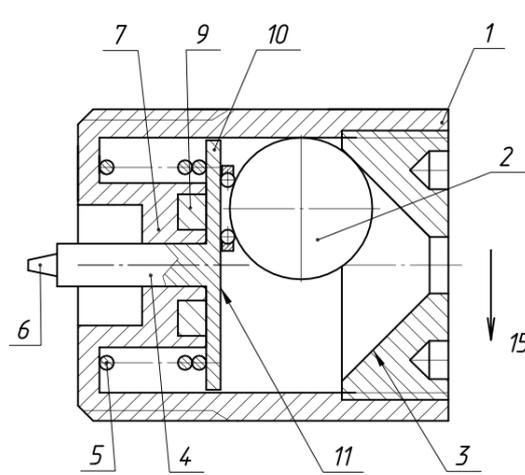


Рис. 4. Накольный механизм с трением качения инерционного тела (шара) при ударном ускорении в поперечном направлении

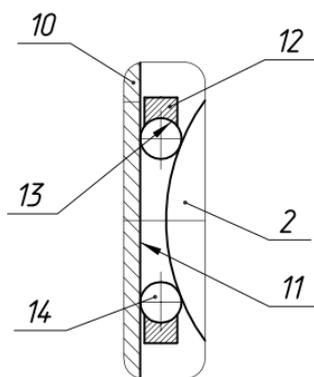


Рис. 5. Опора, обеспечивающая трение качения инерционного тела (шара) при ударном ускорении в боковом направлении

Устройство выполнено следующим образом.

Накольный механизм (рис. 1–3) содержит корпус 1 с установленным в нем инерционным осевым ударником 4, инерционное тело в виде шара 2. Осевого ударника 4 имеет с одного торца накольную иглу 6, взаимодействующую с капсулом-детонатором (не показано), и фланец 10 с другого торца, выполненный с плоской торцевой поверхностью, взаимодействующей с шаром, опирающимся на коническую поверхность 3 конического углубления корпуса.

Корпус 1 имеет направленный внутрь его полости осевой цилиндрический выступ 7 с осевым отверстием под ударник 4 и с кольцевой выемкой 8 на торце, в которой закреплен постоянный магнит 9, намагниченный в осевом направлении.

Корпус 1 и ударник 4 выполнены из магнитомягкого металла. Сопрягаемые подвижные поверхности корпуса 1 и ударника 4 для придания им твердости могут быть подвергнуты термохимической обработке, например цементованию или азотированию.

Инерционное тело – шар 2 – выполнено из «тяжелого», например вольфрамового сплава, его масса превосходит массу ударника 4. Указанное техническое решение из-за преобладания массы шара 2 обеспечивает передачу на осевой ударник 4 примерно одинаковых сил инерции как при осевом, так и боковом перемещении шара 2 (при наличии соответствующих ударных ускорений).

Для возможности исключения трения скольжения инерционного тела (шара) и перехода на трение качения, которое обеспечит надежное срабатывание накольного механизма при встрече взрывного устройства с преградой с малыми скоростями при ударном ускорении в боковом направлении в накольный механизм (рис. 4, 5) между инерционным телом (шаром) 2 и фланцем 10 ударника 4 установлена обойма 12 с канавкой 13 на внутренней цилиндрической поверхности с размещенными в ней по окружности шариками 14, опирающимися на торцевую поверхность 11 фланца 10 и поверхность шара 2.

На внешнем диаметре корпуса 1 выполнена резьба для ввинчивания накольного механизма в объект использования (на рисунках не показано).

Работа накольного механизма

Накольный механизм работает следующим образом.

При потере скорости от встречи взрывного устройства с преградой (ледяными массами) инерционное тело – шар 2 – перемещается по оси (рис. 2) или в боковом направлении (рис. 3), в зависимости от угла встречи с преградой, определяющего направление ударного ускорения 15, и характера поверхности преграды, сдвигая ударник 4 и сжимая пружину 5. В конце хода ударника 4 его фланец 10 «подхватывается» (притягивается) магнитом 9, увеличивая скорость движения ударника 4, а, следовательно, и его кинетическую энергию, обеспечивая надежное задействование капсуля-детонатора.

При условии включения в накольный механизм обоймы 12 (см. рис. 4, 5) инерционное тело – шар 2 – из-за наличия дополнительной опоры в виде обоймы 12 с шариками 14 перемещается всилу ударного ускорения 15 в боковом направлении, без проскальзывания, то есть с малым трением, также обеспечивая надежное задействование капсуля-детонатора при указанных условиях встречи с преградой.

Оснащение накольного механизма установленным в кольцевое углубление 8 цилиндрического выступа 7 магнитом 9, намагниченным в осевом направлении, и выполнение корпуса 1 и ударника 4 из магнитомягкого металла с фланцем 10, взаимодействующим своей плоской торцевой поверхностью 11 с инерционным телом – шаром 2, опирающимся на коническую поверхность 3 конического углубления корпуса 1, позволяет повысить скорость перемещения ударника 4 с накольной иглой 6 в конце его хода за счет дополнительного ускорения ударника 4 магнитом 9. То есть кинетическая энергия ударника 4, затрачиваемая на сжатие цилиндрической пружины 5, восполняется дополнительным притяжением магнитом 9 его фланца 10, обеспечивая надежное задействование капсуля-детонатора. Это дополнительное притяжение не зависит от скорости встречи взрывного устройства с преградой, следовательно, и от величины возникающего при этом ударного ускорения 15, поэтому накольный механизм надежно сработает как при больших, так и малых скоростях встречи взрывного устройства с преградой.

Установка магнита 9 в выемку 8 выступа 7, выполненного из магнитомягкого материала, также обеспечивает меньшее усилие притяжения фланца 10 ударника 4 магнитом 9 при начальных больших зазорах между ними и большее усилие при конечных малых зазорах. Реализуется «падающая» силовая характеристика системы «инерционное тело (шар) 2 – пружина 6 – магнит 9», обеспечивающая надежное задействование капсуля-детонатора накольной иглой 6 ударника 4 при различных скоростях и углах встречи в составе взрывного устройства с преградой.

Выполнение инерционного тела в виде шара 2 и установка его между торцевой плоской поверхностью фланца 10 осевого ударника 4 и конической поверхностью 3 конического углубления корпуса обеспечивает передачу на осевой ударник 4 сил инерции шара 2 как при его осевом, так и боковом перемещении (при наличии соответствующих ударных ускорений).

Использование в накольном механизме обоймы 12, установленной между инерционным телом (шаром) 2 и фланцем 10 толкателя 4 и имеющей канавку 13 на внутренней цилиндрической поверхности с размещенными в ней по окружности шариками 14, опирающимися на торцевую поверхность 11 фланца 10 и поверхность шара 2, позволяет исключить трение скольжения инерционного тела (шара) 2 и перейти на трение качения, которое обеспечит надежное срабатывание накольного механизма при встрече взрывного устройства с преградой с малыми скоростями под любыми углами (при ударных ускорениях в любых боковых направлениях).

Техническое решение накольного механизма защищено патентом РФ [1].

Математическая модель накольного механизма

Введем прямоугольную систему координат $OXYZ$, связанную с корпусом 1. Начало O системы координат – в начальном положении центра масс шара 3. Направления осей показаны на рис. 6. Орты осей являются правой тройкой векторов.

На рис. 6 показаны силы, действующие на шар 3 и ударник 2.

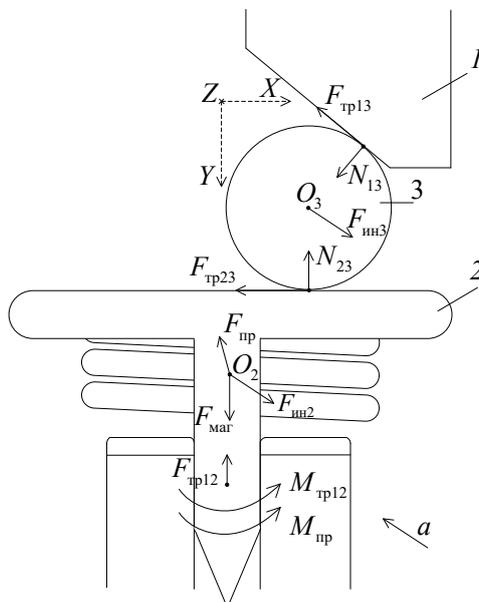


Рис. 6. Силы, действующие на шар и ударник

Координаты центров масс ударника 2 (O_2) и шара 3 (O_3) – ($X_2; Y_2; Z_2$) и ($X_3; Y_3; Z_3$) соответственно.

Силы, действующие на шар 3

Сила инерции $\vec{F}_{ин3}$ с добавленной силой тяжести

$$\vec{F}_{ин3} = m_3(\vec{g} - \vec{a}), \quad (1)$$

где m_3 – масса шара 3; \vec{a} – ускорение СЗ в месте расположения шара 3; \vec{g} – ускорение свободного падения.

Силы трения $\vec{F}_{тр13}$ (между поверхностями шара 3 и корпуса 1) и $\vec{F}_{тр13}$ (между поверхностями шара 3 и фланцем ударника 2) определяются следующим образом:

– при перемещении взаимодействующих поверхностей друг относительно друга:

$$\vec{F}_{тр13} = \mu_c \vec{N}_{13}, \quad (2)$$

$$\vec{F}_{тр23} = \mu_c \vec{N}_{23}, \quad (3)$$

где μ_c – коэффициент трения скольжения; $\vec{N}_{13}, \vec{N}_{23}$ – нормальные составляющие реакций сил давления шара 3 на корпус 1 и шара 3 на фланец ударника 2;

– при отсутствии перемещения взаимодействующих поверхностей друг относительно друга:

$$\vec{F}_{тр13} \leq \mu_n \vec{N}_{13}, \quad (4)$$

$$\vec{F}_{тр23} \leq \mu_n \vec{N}_{23}, \quad (5)$$

где μ_n – коэффициент трения покоя.

Силы, действующие на ударник 2

Сила инерции $\vec{F}_{ин2}$ определяется по аналогии с $\vec{F}_{ин3}$.

Величина силы упругости пружины $F_{пр}$ определяется следующим образом:

$$F_{пр} = F_{пр_0} + C_{пр} Y_2, \quad (6)$$

где $F_{пр_0}$ – начальное усилие пружины; $C_{пр}$ – жесткость пружины.

Магнитная сила $\vec{F}_{маг}$ определяется путем интерполяции по таблице ее значений, определенных экспериментально и/или рассчитанных с использованием методов конечно-элементного анализа.

Сила трения $\vec{F}_{тр12}$ (между поверхностями ударника 2 и корпуса 1) определяется по аналогии с $\vec{F}_{тр13}$.

Уравнения движения шара 3 и ударника 2 относительно корпуса 1 запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_3 \vec{a}_3 = \vec{F}_{ин3} + \vec{F}_{тр13} + \vec{F}_{тр23} + \vec{N}_{13} + \vec{N}_{23}; \\ m_2 \vec{a}_2 = \vec{F}_{ин2} + \vec{F}_{пр} + \vec{F}_{тр12} + \vec{F}_{маг} + \vec{N}_{12}; \\ \frac{d\vec{L}_2}{dt} = \vec{M}_{пр} + \vec{M}_{тр12}, \end{cases} \quad (7)$$

где \vec{a}_3, \vec{a}_2 – ускорения шара 3 и ударника 2 относительно корпуса 1; \vec{L}_2 – момент количества движения ударника 2; $\vec{M}_{пр}$ – момент сил, действующих на ударник 2 со стороны пружины; $\vec{M}_{тр12}$ – момент сил трения, возникающих между поверхностями ударника 2 и корпуса 1.

Система уравнений (7) решается численно при соответствующих начальных условиях. Проведены расчеты, подтвердившие работоспособность СЗ для следующих вариантов ударного нагружения:

- вариант № 1 – ударное ускорение в осевом направлении (вдоль оси OX);
- вариант № 2 – ударное ускорение в поперечном направлении (вдоль оси OY).

Заключение

Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного накольного механизма, обеспечивающего надежное срабатывание при встрече с преградой со сложной поверхностью под различными углами и с малыми скоростями.

Разработанная математическая модель значительно сократила продолжительность разработки механизма, позволив выбрать еще при выпуске конструкторской документации оптимальные конструктивные параметры. Подобная возможность подтверждается по результатам разработок подобных приборов [2, 3].

Список литературы

1. Пат. РФ 2822849, МПК F42 С 1/04. Накольный механизм / Китаев В. Н., Уралев А. А., Дремков М. А. № 2024101157 ; заявл. 18.01.2024, опубл. 15.07.2024.
2. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный включатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
3. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.

References

1. Patent Russian Federation 2822849, МПК F42 С 1/04. *Nakol'nyy mekhanizm = Knee mechanism*. Kitaev V.N., Urallev A.A., Dremkov M.A. № 2024101157; appl. 18.01.2024, publ. 15.07.2024. (In Russ.)
2. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Inertial switch with hydraulic damping of an inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10
3. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb@vniitf.ru

Роман Львович Афанасьев

заместитель начальника отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Максим Владимирович Петров

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Roman L. Afanasyev

Deputy head of department,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Maksim V. Petrov

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vasilyeva street, Snezhinsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 04.04.2025

Поступила после рецензирования/Revised 14.04.2025

Принята к публикации/Accepted 02.05.2025