ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(11-1):51-60
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 531/534 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_51

АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ, ПОДАВАЕМЫХ МНОГОЗАХОДНЫМ ШНЕКОМ В РАБОЧУЮ ЗОНУ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ВЗРЫВНОГО УСТРОЙСТВА

В.О. Соловьев[1], С.Б. Макаров[1], А.Н. Никифоров[1]

[1] Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия, e-mail: n.andre@mail.ru

Аннотация: Представлены результаты численных исследований по оценке предельного удельного расхода цилиндрических зарядов взрывчатого вещества, подаваемых многозаходными шнеками в отражатели пульсирующих взрывных устройств, а также определена масса шнеков со сплошным и полым валом в зависимости от числа их заходов. Соответственно, объектом исследования являются многоразовые твердотопливные пульсирующие взрывные устройства многоцелевого применения, а предметом исследования – высокоскоростной механизм с регулируемой подачей цилиндрических зарядов в рабочую зону (к отражателю пульсирующих взрывных устройств). Цель работы состоит в численной оценке влияния количества заходов шнека и их массы, а также геометрических характеристик используемых твердых зарядов на предельный удельный расход их подачи в рабочую зону отражателя. При этом границы исследования составляют многозаходные шнеки с числом заходов от 2 до 7 шт., а также заряды гексогена и тротила массой от 6 до 18 г, с плотностью заряжания 1000 кг/м^3 и размерами от 20 до 30 мм.

Ключевые слова: механическая система, частота подачи, твердые заряды, шнек, винт, отражатель, рабочая зона, высокая скорость.

Благодарность: Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией), FFGU-2024-0018.

Для цитирования: *Соловьев В. О., Макаров С. Б., Никифоров А. Н.* Анализ предельного расхода цилиндрических зарядов, подаваемых многозаходным шнеком в рабочую зону пульсирующего взрывного устройства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 11-1. – С. 51–60. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_51.

Estimation for peak delivery of cylindrical propellants by multi-entry augers into reflectors of pulsating explosive devices

V.O. Soloviev[1], S.B. Makarov[1], A.N. Nikiforov[1]

[1] Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, e-mail: n.andre@mail.ru

Abstract: The article presents some results of numerical studies on determining the peak supply of cylindrical propellants by multi-entry augers into reflectors of pulsating explosive devices, and also determined the mass of augers with entire and hollow shafts depending on the number of their entries. Respectively the research object is reusable solid-fuel pulsating explosive

© В.О. Соловьев, С.Б. Макаров, А.Н. Никифоров. 2026.

devices of multi-purpose application, and the research subject is a high-speed mechanism with adjustable supply of cylindrical propellants in the working zone (to the reflector of pulsating explosive devices). The research purpose consist to numerically assess the effect for the entry and mass of augers, as well as the geometric characteristics of the cylindrical propellants used, on the upper specific rate of their delivery to the working zone of the reflector. The research limits include augers with 2 to 7 entries, as well as hexogen and TNT charges with mass of 6 to 18 g and density of 1 g per cube cm, with diameter 20 mm and length 25 mm.

Key words: mechanical system, delivery frequency, solid charges, auger, screw, reflector, working zone, high speed.

Acknowledgements: This work was supported by ongoing institutional funding (the code FFGU-2024-0018) of the Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN). No additional grants to carry out or direct this particular research were obtained.

For citation: Soloviev V. O., Makarov S. B., Nikiforov A. N. Estimation for peak delivery of cylindrical propellants by multi-entry augers into reflectors of pulsating explosive devices. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(11-1):51-60. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_111_0_51.

Введение

Для разработки конструктивных решений высокопроизводительных многоразовых пульсирующих взрывных устройств (ПВУ) различного целевого назначения необходимо оценить предельные удельные расходы цилиндрических зарядов взрывчатого вещества (ВВ), подаваемых многозаходными шнеками в рабочую зону многоразового (неразрушаемого) отражателя [1]. К потенциальным объектам применения предлагаемой технологии в горном деле относятся карьеры, шахты и рудники с породами любой категории крепости для проходки скважин диаметром от 200 до 700 мм.

Для оценки требуемых режимов работы ПВУ авторы ориентировались как на комплексы и устройства для взрывного бурения [2] и разрушения горных пород [3, 4], так и на ракетные двигатели, работающие в режиме горения [5] и детонации топлива [6, 7]. Среди последних особенно эффективны (имеют высокий КПД) импульсные [8, 9].

При взрывном бурении или разрушении пород, а также волновом резонансе, усиливающем разрушение пород, рост трещин в породах развивается за миллисекунды [3, 10]. Следовательно, для ПВУ удельный расход (подача) цилиндрических зарядов ВВ в зону отражателя и их инициирование также должны соответствовать миллисекундному диапазону.

Другой подход применяется к ракетным двигателям, для которых многорежимность (двигателя) является одним из его важнейших показателей [11, 12]. При этом верхней границей его рабочего диапазона является предельный форсажный режим — максимальная мощность двигателя. Для твердотопливных ПВУ предельный форсажный режим определяется прежде всего двумя факторами — временем детонации единичного заряда ВВ и временем разброса срабатывания детонаторов, инициирующих данные заряды. Для зарядов гексогена и тротила массой от 6 до 18 г, при плотности заряжания 103 кг/м^3, время полной детонации зарядов находится в диапазоне от 1,6 до 2,2 мкс [13]. Выпускаемые отечественной промышлен-

ностью электродетонаторы последнего поколения имеют разброс времени срабатывания не более 0,5 мкс (например, АТЭД-15), т.е. время детонации зарядов в 3,2 — 4,4 раза превышает разброс времени срабатывания современных детонаторов. Для твердотопливных ПВУ предельный форсажный режим подачи зарядов ВВ массой от 6 до 18 г в рабочую зону отражателя соответствует диапазону от 4500 до 9000 шт/с. Отсюда предельный удельный расход (подача) цилиндрических зарядов ВВ в зону отражателя и их инициирование для этих ПВУ должны соответствовать микросекундному диапазону.

Постановка задачи

В работах [14, 15] показано, что перспективным и важнейшим элементом механического устройства подачи является многозаходный шнек, сочетающий высокий удельный расход (за счет высокой скорости его вращения и многозаходности) с доступностью его регулировки (путем изменения скорости вращения). При этом установлено, что резонансные свойства многозаходного шнека можно с точностью до 5...7% прогнозировать с помощью технической теории изгиба стержней постоянного сечения [16, 17].

В [18] установлено, что геометрические параметры самого шнека (диаметр центрального вала, угол наклона винтовых лопастей и другие) связаны с геометрическими размерами транспортируемых им цилиндров общей системой уравнений (1) — (4), описывающих геометрию конструкции «шнек с транспортируемым цилиндром».

$$d_0^3 + \left(3D - \frac{sD}{\pi} - \frac{sL^2}{\pi D}\right)d_0^2 + \\ +2\left(D^2 - \frac{sD^2}{\pi} - \frac{sL^2}{\pi}\right)d_0 - \frac{sDL^2}{\pi} = 0 \qquad (1)$$

$$h_s = \pi s L \frac{D + d_0}{\pi(D + d_0) - sD}, \qquad (2)$$

$$d_c = \sqrt{(D + d_0)^2 - D^2}, \qquad (3)$$

$$tg\,\alpha_c = \frac{h_s}{\pi d_c}, \qquad (4)$$

где d_0 — диаметр центрального вала шнека, мм; s — число заходов шнека, шт; D и L — диаметр и длина транспортируемого заряда, мм; h_s — шаг винтовой лопасти при s заходах, мм; d_c — диаметр места контакта винтовой лопасти с зарядом, мм; α_c — угол подъема (или наклона $\beta^c = 90° - \alpha_c$) винтовой линии на диаметре d_c, град.

Как в [18], так и в настоящей статье намеренно не указываются схема многоразового твердотопливного ПВУ и особенности его функционирования, в т.ч. способы удаления газов и разрушенного на забое шлама в процессе проходки скважины. Соответствующие механизмы прорабатываются и находятся в стадии оформления заявок на патенты РФ.

Естественной причиной, ограничивающей скорость подачи зарядов многозаходным шнеком, является возникновение его деформаций, нарушающих выполнение геометрических условий (1) — (4) из-за чрезмерного приближения скорости (частоты) вращения шнека к низшей резонансной частоте его упругих колебаний. Отметим, что в ряде механических систем резонанс используют для повышения эффективности технологических процессов [10, 19, 20].

Поэтому оценить предельный удельный расход шашек, допустимый для конкретного многозаходного шнека, можно по формуле

$$K_{max} = sN_{off}F_{res}, \qquad (5)$$

где K_{max} — удельный расход подаваемых шнеком шашек, шт/с; s — количество

Таблица 1

Геометрические размеры шнека для зарядов D = 20 мм и L = 25 мм
Geometric dimensions of the auger for the cylindrical propellants with D = 20 mm & L = 25 mm

Характеристики	Число заходов – *s*, шт.					
	2	3	4	5	6	7
Диаметр центрального вала – d_0, мм	19,49	33,74	48,91	64,52	80,35	96,32
Контактный диаметр винтовой лопасти – d_c, мм	34,05	49,88	65,95	82,12	98,34	114,58
Шаг винта – h_s, мм	73,79	116,35	158,61	200,52	242,19	283,69
Угол подъема винтовой лопасти на ее контактном диаметре с цилиндрами – α_c, град.	34,6	36,6	37,44	37,86	38,09	38,24

заходов шнека, в данном исследовании было рассмотрено от 2 до 7; N_{off} — коэффициент отстройки от резонанса, использовано значение 0,9; F_{res} — низшая резонансная частота шнека, Гц (соответствует скорости его вращения, об/с).

Задача описываемого исследования

Расчетные исследования выполнены для 6 видов шнеков — от 2 до 7 заходов, геометрия которых соответствовала выражениям (1) — (4) для цилиндрических зарядов двух размеров: *D* = 20 мм, *L* = = 25 мм и *D* = *L* = 30 мм. Числовые значения геометрических параметров шнеков представлены в табл. 1 и 2.

Данные табл. 1 и 2 показывают сильную зависимость геометрических размеров шнека от количества заходов на нем — например, диаметры центрального вала шестизаходного и двухзаходного шнеков различаются более чем в 4 раза. Из этого следует, что выбранное сочетание размеров — *D* и *L* цилиндрических зарядов ВВ и количества заходов шнека *s* — существенно влияет на его резонансные свойства и, соответственно, на величину максимального для него удельного расхода шашек, согласно (5).

Результаты

Численное моделирование выполнено по методу конечных элементов. Расчетные модели шнеков построены по исходным геометрическим размерам, приведенным в табл. 1 и 2, материа-

Таблица 2

Геометрические размеры шнека для зарядов D = L = 30 мм
Geometric dimensions of the auger for the cylindrical propellants with D = L = 30 mm

Характеристики	Число заходов – *s*, шт.					
	2	3	4	5	6	7
Диаметр центрального вала – d_0, мм	19,48	35,23	52,49	69,95	88,17	106,63
Контактный диаметр винтовой лопасти – d_c, мм	39,35	57,93	76,84	95,34	114,31	133,30
Шаг винта – h_s, мм	97,71	160,47	223,48	287,19	349,39	411,148
Угол подъема винтовой лопасти на ее контактном диаметре с цилиндрами – α_c, град.	38,32	41,41	42,79	43,80	44,21	44,47

лом шнека принята сталь 45. Толщина винтовых лопастей шнеков составляет 2 мм для зарядов D = 20 мм, L = 25 мм; 3 мм для зарядов $D = L$ = 30 мм.

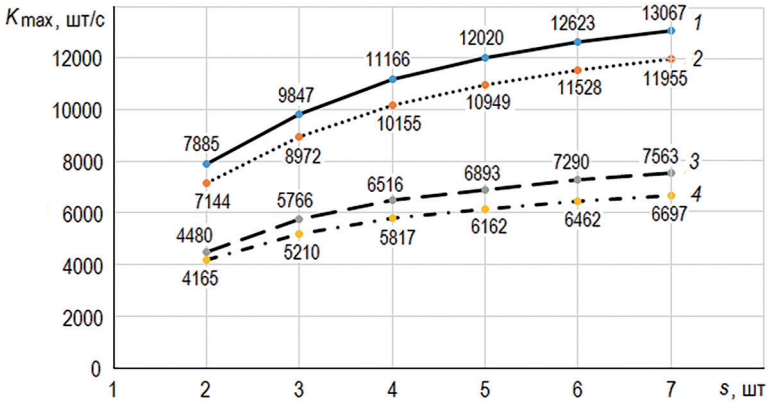
Из табл. 1 и 2 видно, что с увеличением количества заходов шнека кратно возрастает диаметр его центрального вала, что увеличивает массу шнека и, соответственно, изменяет его резонансные свойства. Поэтому целесообразно исследовать шнеки с полым центральным валом и толщиной стенки 3 мм для шнеков под заряды D = 20 мм, L = 25 мм и 4 мм под заряды $D = L$ = 30 мм.

Таким образом, всего были исследованы 24 расчетные модели шнеков: 12 шт. под заряды габаритом D = 20 мм, L = 25 мм (6 шт. со сплошным центральным валом и 6 шт. с полым центральным валом) и, аналогично, 12 расчетных моделей под заряды габаритом $D = L$ = 30 мм. Для каждой расчетной модели были определены и проанализированы собственные частоты и формы упругих колебаний шнека, шарнирно опертого по торцам, а по выражению (5) определен предельно допустимый удельный расход шашек для конкретной конфигурации шнека.

Для всех проанализированных моделей, как и ожидалось, низшими упругими формами колебаний оказались изгибные колебания по 1-й форме кратности 2 (в двух ортогональных плоскостях, проходящих через ось вращения шнека). «Оболочечные» формы колебаний винтовых лопастей шнека начинали проявляться в виде суперпозиции с высшими (2-й и 3-й) формами его изгибных колебаний.

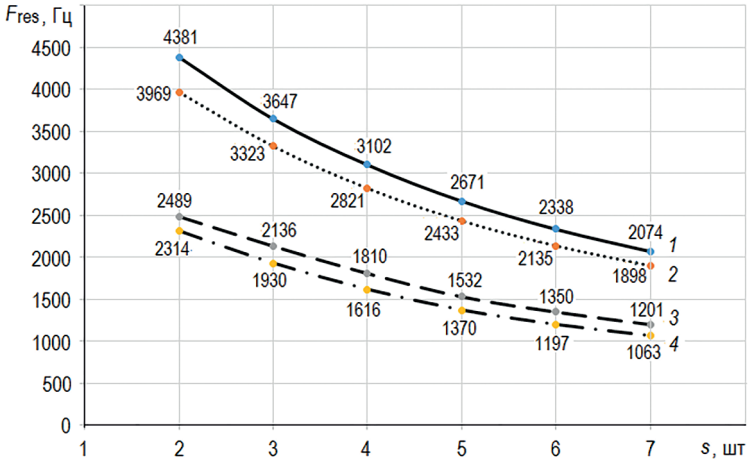
На рис. 1 представлены предельно допустимые (5) удельные расходы шнека — K_{max} с различным числом заходов — s для зарядов D = 20 мм, L = 25 мм и $D = L$ = 30 мм. На рис. 2 приведены низшие собственные частоты изгибных колебаний шнеков, допустимый удельный расход (подача) которых представлен на рис. 1. Результаты, представленные на рис. 1 и 2, показывают следующее:

1) при увеличении количества заходов шнека от 2 до 7 его максимально допустимый удельный расход шашек возрастает примерно на 65% относительно 2-заходного шнека, причем это увеличение не зависит от размера шашек и конструкции центрального вала шнека (сплошной он или полый);



1 и 2 – для шнеков с полым и сплошным центральным валом подающих заряды, D = 20 мм, L = 25 мм;
3 и 4 – для шнеков с полым и сплошным центральным валом подающих заряды, $D = L$ = 30 мм

Рис. 1. Предельный удельный расход (подача) зарядов для многозаходных шнеков:
Fig. 1. Upper specific delivery of the cylindrical propellants by multi-entry augers



1 и 2 – для шнеков с полым и сплошным центральным валом подающих заряды, D = 20 мм, L = 25 мм;
3 и 4 – для шнеков с полым и сплошным центральным валом подающих заряды, $D = L$ = 30 мм

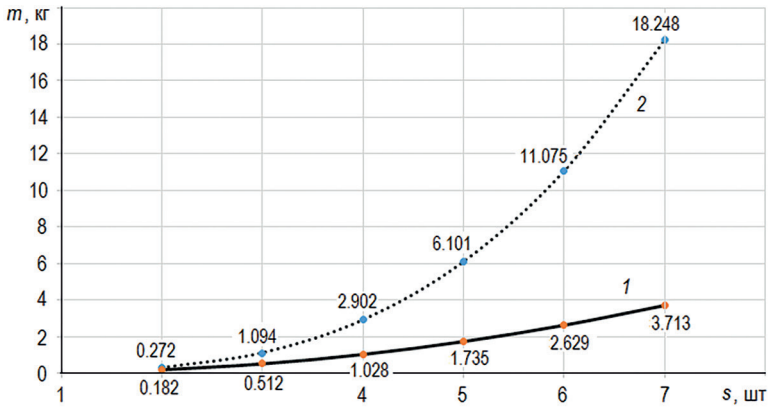
Рис. 2. Низшие собственные частоты изгибных колебаний многозаходных шнеков
Fig. 2. Lower eigenfrequencies of flexible oscillations for multi-entry augers

2) величина низшей собственной частоты изгибных колебаний шнека при увеличении числа его заходов от 2 до 7 снижается примерно в 2 раза, причем это относительное снижение не зависит от размера шашек и конструкции центрального вала шнека (сплошной он или полый);

3) для зарядов размером D = 20 мм, L = 25 мм при 4- и 5-заходном шнеке допустимы удельные расходы 11 000 — 12 000 шт/с; для зарядов $D = L$ = 30 мм, при том же числе заходов, допустимы удельные расходы 6500 — 6900 шт/с.

Далее на рис. 3 и рис. 4 приведены массы шнеков с различным числом заходов для зарядов с размерами D = 20 мм, L = 25 мм и $D = L$ = 30 мм.

Данные рис. 3 и 4 показывают значительный (кратный) рост массы шнека при увеличении числа его заходов. При этом для шнека со сплошным централь-



1 – с полым центральным валом

2 – со сплошным центральным валом

Рис. 3. Массы шнеков для зарядов с D = 20 мм, L = 25 мм
Fig. 3. Masses of multi-entry augers for the propellants with D = 20 mm, L = 25 mm

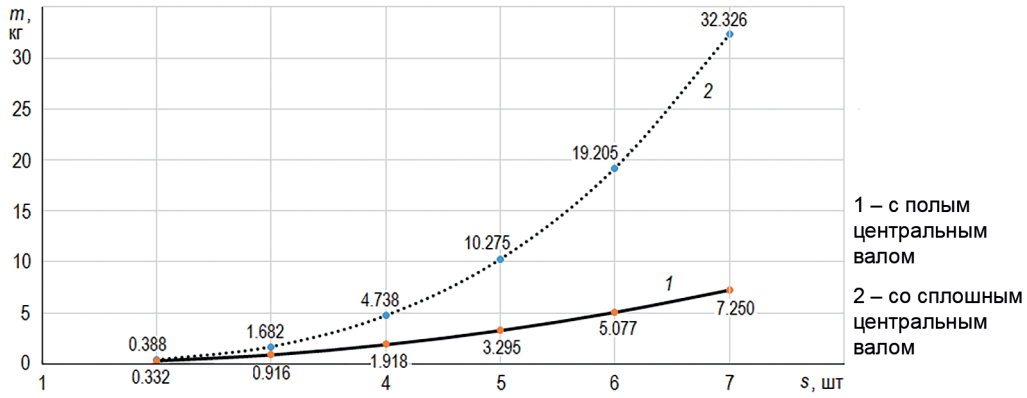


Рис. 4. Массы шнеков для зарядов с D = L = 30 мм
Fig. 4. Masses of multi-entry augers for the propellants with D = L = 30 mm

ным валом увеличение его массы при росте числа заходов приобретает экспоненциальный характер и не зависит от размера шашек.

Эти обстоятельства являются следствием отмеченной ранее сильной зависимости геометрических размеров шнека от количества заходов на нем и геометрических размеров транспортируемых цилиндрических зарядов (см. уравнения (1) — (4) и табл. 1 и 2).

Например, для шнека, проектируемого для зарядов с размером D = 20 мм, L = = 25 мм (см. рис. 3), при увеличении числа заходов — s с 3 до 6 его масса с полым центральным валом увеличивается в 5,1 раза, а со сплошным центральным валом — в 10,1 раза. Для шнека, проектируемого для зарядов с размером $D = L$ = 30 мм (см. рис. 4), при увеличении числа заходов — s с 3 до 6 его масса с полым центральным валом увеличивается в 5,54 раза, а со сплошным центральным валом — в 11,4 раза. Исследование показало, что увеличение массы шнека с ростом числа его заходов происходит примерно на 10% интенсивнее для зарядов больших размеров.

Отмеченная на рис. 3 и 4 зависимость массы шнека, предназначенного для скоростной подачи цилиндрических зарядов, от количества его заходов указывает, что рациональной является только его конструкция с полым центральным валом.

Выводы

Таким образом, оценен предельно допустимый удельный расход (подача) цилиндрических зарядов определенного размера шнеком в зависимости от количества заходов на нем. Для цилиндрических зарядов с размером D = 20 мм, L = 25 мм предельный расчетный удельный расход для 6- и 7-заходных шнеков составил 12 623 и 13 067 шт./с, а для цилиндрических зарядов Ø30х30 мм — соответственно 7290 и 7563 шт./с.

Отмеченные скоростные возможности многозаходных шнеков основаны на естественных физических и геометрических свойствах их конструкции — на изгибных резонансах и многозаходности, а не базируются на специальных материалах конструкции или специальных технологиях ее изготовления.

Проведенное численное исследование показывает, что предлагаемое механическое устройство подачи обеспечивает:

- полное перекрытие диапазона роста трещин при взрывном бурении горных пород продуктами детонации, в т.ч. резонансный режим разрушения породы;

• достижение рабочего диапазона твердотопливных детонационных ракетных двигателей, включая нижнюю зону их форсажного режима, т.е. теоретическую возможность их работы как при маршевом режиме, так и при форсажном.

Представленные результаты являются началом создания базы оценочных данных о предельных расходах многозаходного шнека, зависящих от размеров зарядов и числа его заходов. Такая информационная база нужна при планировании и подготовке натурных экспериментов по отработке высокоскоростного механического устройства с автоматизированной и регулируемой подачей зарядов ВВ в рабочую зону ПВУ, что представляет собой задачу дальнейших исследований авторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соловьев В. О.*, *Кельнер М. С.* Защита стальных отражателей от разрушающего воздействия продуктов детонации, использующихся в твердотопливных пульсирующих взрывных устройствах // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2015. — № 1. — С. 88—93.

2. *Виноградов Ю. И.*, *Артемов В. А.* Влияние диаметра заряда на коэффициент полезного действия взрыва // Записки Горного института. — 2012. — Т. 198. — С. 170—173.

3. *Кутузов Б. Н.* Современное состояние и перспективы применения в промышленности патронной и струйной технологии бурения скважин и разрушения твердых сред. Аналитический обзор. — М.: Квазар-ВВ, 1995. — 59 с.

4. *Кантор В. Х.* Оценка работоспособности и определение оптимальных параметров скважинных зарядов эмульсионных взрывчатых веществ при взрыве в горных породах // Проблемы недропользования. — 2022. — № 3. — С. 14—26. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.014.

5. *Тимнат И.* Ракетные двигатели на химическом топливе. Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 294 с.

6. *Kumar V.* Rocket propulsion: Classification of different types of rocket propulsion system and propulsive efficiency // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2019, vol. 3, no. 12, pp. 99—102.

7. *Wen H., Wang B.* Primary investigation on Ram-Rotor Detonation Engine // Chinese Journal of Aeronautics. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 66—80. DOI: 10.1016/j.cja.2024.05.016.

8. *Фролов С. М.* Импульсные детонационные двигатели. — М.: Торус Пресс, 2006. — 592 с.

9. *Pandey K. M.*, *Debnath P.* Review on recent advances in pulse detonation engines // Journal of Combustion. 2016, vol. 2016, article 4193034. DOI: 10.1155/2016/4193034.

10. *Ганиев О. Р.*, *Ганиев Р. Ф.*, *Украинский Л. Е.* Резонансная макро- и микромеханика нефтяного пласта. Интенсификация добычи нефти и повышение нефтеотдачи. Наука и практика. — М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. — 256 с.

11. *Harris P., Stowe R., Ripley R., Guzik S.* Pulse detonation engine as a ramjet replacement // Journal of Propulsion and Power. 2006, vol. 22, no. 2, pp. 462—473.

12. *Bykovskii F., Zhdan S., Vedernikov E.* Continuous spin detonations // Journal of Propulsion and Power. 2006, vol. 22, no. 6, pp. 1204—1216.

13. *Добрынин А. А.* Взрывчатые вещества. Химия. Составы. Безопасность. — М.: ФГАОУ ДПО «ИПК ТЭК», 2014. — 518 с.

14. *Соловьев В. О.*, *Макаров С. Б.* Разработка многоразового твердотопливного пульсирующего взрывного устройства для бурения горных пород различной категории крепости // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2023. — № 3. — С. 97—102.

15. *Соколов М. В.*, *Клинков А. С.*, *Ефремов О. В.*, *Беляев П. С.*, *Однолько В. Г.* Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 248 с.

16. *Феодосьев В. И.* Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1970. — 544 с.

17. *Тимошенко С. П.*, *Янг Д. Х.*, *Уивер У.* Колебания в инженерном деле. Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1985. — 472 с.

18. *Соловьев В. О.*, *Никифоров А. Н.*, *Макаров С. Б.* Определение геометрических характеристик шнека для эффективной подачи цилиндрических шашек-зарядов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2025. — № 5. — С. 24—29.

19. *Пановко Г. Я.*, *Шохин А. Е.* Динамика резонансных вибромашин с самосинхронизирующимися дебалансными вибровозбудителями. — М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2020. — 168 с.

20. *Лян И. П.*, *Пановко Г. Я.* Исследование влияния обрабатываемой среды на колебания рабочего органа резонансной вибромашины // *Endless Light in Science*. — 2025. — № 1. — С. 268—277. ГИАБ

REFERENCES

1. Solov'ev V. O., Kel'ner M. S. Protection of steel reflectors against the destructive effect of detonation products used in solid-propellant pulsating explosive devices. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015, no. 1, pp. 88—93. [In Russ].

2. Vinogradov Yu. I., Artemov V. A. Influence of charge diameter on explosion efficiency. *Journal of Mining Institute*. 2012, vol. 198, pp. 170—173. [In Russ].

3. Kutuzov B. N. *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy primeneniya v promyshlennosti patronnoy i struynoy tekhnologii bureniya skvazhin i razrusheniya tverdykh sred. Analiticheskiy obzor* [Current state and prospects for industrial application of cartridge-based and jet-based technologies for borehole drilling and the fragmentation of solid media: An analytical review], Moscow, Kvazar-VV, 1995, 59 p.

4. Kantor V. X. Evaluation of operability and determination of optimal parameters of emulsion explosive borehole charges during explosion in rock mass. *Problems of Subsoil Use*. 2022, no. 3, pp. 14—26. [In Russ]. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.014.

5. Timnat Y. *Raketnye dvigateli na khimicheskom toplive*. Per. s angl. [Advanced chemical rocket propulsion. English–Russian translation], Moscow, Mir, 1990, 294 p.

6. Kumar V. Rocket propulsion: Classification of different types of rocket propulsion system and propulsive efficiency. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*. 2019, vol. 3, no. 12, pp. 99—102.

7. Wen H., Wang B. Primary investigation on Ram-Rotor Detonation Engine. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024, vol. 37, no. 11, pp. 66—80. DOI: 10.1016/j.cja.2024.05.016.

8. Frolov S. M. *Impul'snye detonatsionnye dvigateli* [Pulse detonation engines], Moscow, Torus Press, 2006, 592 p.

9. Pandey K. M., Debnath P. Review on recent advances in pulse detonation engines. *Journal of Combustion*. 2016, vol. 2016, article 4193034. DOI: 10.1155/2016/4193034.

10. Ganiev O. R., Ganiev R. F., Ukrainskiy L. E. *Rezonansnaya makro- i mikromekhanika neftyanogo plasta. Intensifikatsiya dobychi nefti i povyshenie nefteotdachi. Nauka i praktika* [Resonant macro- and micromechanics of oil reservoirs. Oil production intensification and enhanced oil recovery. Science and practice], Moscow — Izhevsk, 2014, 256 p.

11. Harris P., Stowe R., Ripley R., Guzik S. Pulse detonation engine as a ramjet replacement. *Journal of Propulsion and Power*. 2006, vol. 22, no. 2, pp. 462—473.

12. Bykovskii F., Zhdan S., Vedernikov E. Continuous spin detonations. *Journal of Propulsion and Power*. 2006, vol. 22, no. 6, pp. 1204—1216.

13. Dobrynin A. A. *Vzryvchatye veshchestva. Khimiya. Sostavy. Bezopasnost'* [Explosives. Chemistry. Compositions. Safety], Moscow, 2014, 518 p.

14. Solov'ev V. O., Makarov S. B. Development of a reusable solid-fuel pulsating explosive device for drilling rocks of various strength categories. *Engineering & automation problems*. 2023, no. 3, pp. 97—102. [In Russ].

15. Sokolov M. V., Klinkov A. S., Efremov O. V., Belyaev P. S., Odnol'ko V. G. A*vtomatizirovannoe proektirovanie i raschet shnekovykh mashin* [Computer-aided design and analysis of screw machines], Moscow, Mashinostroenie-1, 2004, 248 p.

16. Feodos'ev V. I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials], Moscow, Nauka, 1970, 544 p.

17. Timoshenko S. P., Young D. H., Weaver W. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Per. s angl. [Vibration problems in engineering. English–Russian translation], Moscow, Mashinostroenie, 1985, 472 p.

18. Soloviev V. O., Nikiforov A. N., Makarov S. B. Determination of the geometric characteristics of an auger for efficient feeding of cylindrical charge blocks. J*ournal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2025, no. 5, pp. 24—29. [In Russ].

19. Panovko G. Ya., Shokhin A. E. *Dinamika rezonansnykh vibromashin s samosinkhroniziruyushchimisya debalansnymi vibrovozbuditelyami* [Dynamics of resonant vibratory machines with self-synchronizing unbalanced vibration exciters], Moscow — Izhevsk, 2020, 168 p.

20. Lian I. P., Panovko G. Ya. Investigation of the influence of the processed medium on the oscillations of the working element of a resonant vibration machine. *Endless Light in Science*. 2025, no. 1, pp. 268—277. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соловьев Виктор Олегович[1] — д-р техн. наук,
заведующий отделом, e-mail: solovievvo@yandex.ru,
Макаров Сергей Борисович[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: sb-makarov@yandex.ru,
Никифоров Андрей Николаевич[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: n.andre@mail.ru,
[1] Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН.
Для контактов: Никифоров А.Н., e-mail: n.andre@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.O. Soloviev[1], Dr. Sci. (Eng.), Head of Department,
e-mail: solovievvo@yandex.ru,
S.B. Makarov[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: sb-makarov@yandex.ru,
A.N. Nikiforov[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
e-mail: n.andre@mail.ru,
[1] Mechanical Engineering Research Institute
of the Russian Academy of Sciences, 101000, Moscow, Russia.
Corresponding author: A.N. Nikiforov, e-mail: n.andre@mail.ru.

Получена редакцией 02.08.2026; получена после рецензии 08.10.2026; принята к печати 20.10.2026.
Received by the editors 02.08.2026; received after the review 08.10.2026; accepted for printing 20.10.2026.

ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ
(специальный выпуск), смотри на www. gornaya-kniga.ru

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ ИЗУЧЕНИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ПРИ ЗАХОРОНЕНИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
(2026, № 7, СВ 28, 16 с.)

Гуляев Павел Александрович — аспирант, НИТУ МИСИС, e-mail: pavelgulaev722@gmail.com,
Николенко Петр Владимирович — докт. техн. наук, НИТУ МИСИС, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5126-6576.

ULTRASONIC INTERFEROMETRY AS A TOOL FOR STUDYING GRADIENT THERMAL FIELDS IN ROCKS DURING RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

P.A. Gulyaev, Graduate Student, NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: pavelgulaev722@gmail.com,
P.V. Nikolenko, Dr. Sci. (Eng.), NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: p.nikolenko@misis.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5126-6576.