

УДК 625.768.5

DOI 10.46960/1816-210X_2025_3_117

EDN GDSOTB

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ЛЕДОВОЙ МАССЫ РОТОРНЫМ МЕТАТЕЛЕМ

И.С. НикандровORCID: 0000-0001-9502-0298 e-mail: mnnd@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Л. Малыгин**ORCID: 0000-0002-2429-0685 e-mail: al.malygin.dpi@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***В.Ф. Кулепов**ORCID: 0000-0002-8319-3973 e-mail: kulepov@dpingtu.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***А.Д. Шурашов**ORCID: 0000-0002-1330-7840 e-mail: ktmdpington@mail.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***М.А. Коноплева**ORCID: 0009-0009-3492-6024 e-mail: maria.k-h@yandex.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
*Нижний Новгород, Россия***Ю.В. Краснов**ORCID: 0000-0003-2941-2669 e-mail: krasnov1955@internet.ruНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Изучено метание измельченной снежно-ледовой массы роторным метателем диаметром 1000 мм с закругленными лопатками. Масса содержала более 50 % частиц размером менее 20 мм. Она может быть отнесена к среднекусковым материалам с максимальным размером частиц не более 160 мм. Удельный вес образцов составлял 480-510 кг/м³. Скорость витания частиц обеспечивалась критической частотой вращения лопаток ротора более 45 об/мин. Показано, что ширина прохода материала в пространство между лопатками должно быть не менее двух максимальных размеров кусков. Для ротора диаметром 1000 мм максимальное число лопаток не должно превышать 10 единиц. Глубину патрубка выброса массы следует принимать с учетом коэффициента запаса равного 1,1. Исследование метания массы сменными лопатками ротора с закруглением их в интервале отношения диаметра закругления лопаток к диаметру ротора равного 0,6-0,9 показало, что оптимальное отношение d_n/D_p равно 0,7-0,8. При нем обеспечивается дальность отброса массы более 20 м и уменьшение энергетических затрат на метание на одну треть ее величины для прямых лопаток. Получено уравнение расчета радиусов центров окружностей закругления лопаток ротора имеющее вид $R_n = 0,62 R_p$ для отношения $d_n/D_p = 0,7 - 0,8$. Оптимум радиуса центров окружностей закругления лопаток обеспечивает выброс более 80% массы в зоне полюса патрубка выброса.

Ключевые слова: снежно-ледовая масса, метание, роторный метатель, очистка от заснеженных торов, кривизна лопаток, дальность выброса, энергозатраты на выброс.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Никандров, И.С. Исследование метания измельченной ледовой массы роторным метателем / И.С. Никандров, А.Л. Малыгин, В.Ф. Кулепов, А.Д. Шурашов, М.А. Коноплева, Ю.В. Краснов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 3. С. 117-124. EDN: GDSOTB

INVESTIGATION OF THE THROWING OF CRUSHED ICE MASS BY A ROTARY THROWER

I.S. Nikandrov

ORCID: **0000-0001-9502-0298** e-mail: **mnnd@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.L. Malygin

ORCID: **0000-0002-2429-0685** e-mail: **al.malygin.dpi@yandex.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

V.F. Kulepov

ORCID: **0000-0002-8319-3973** e-mail: **kulepov@dpingtu.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

A.D. Shurashov

ORCID: **0000-0002-1330-7840** e-mail: **ktmdpingt@mail.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

M.A. Konopleva

ORCID: **0009-0009-3492-6024** e-mail: **maria.k-h@yandex.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Yu.V. Krasnov

ORCID: **0000-0003-2941-2669** e-mail: **krasnov1955@internet.ru**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The throwing of crushed snow and ice mass by a rotary thrower with a diameter of 1000 mm with rounded blades is studied. The mass contained more than 50% of particles less than 20 mm in size. It can be classified as medium-sized materials with a maximum particle size of no more than 160 mm. The specific gravity of the samples was 480 – 510 kg/m³. The velocity of the particles was provided by a critical rotational speed of the rotor blades exceeding 45 rpm. It is shown that the width of the passage of the material into the space between the blades should be at least two maximum sizes of the pieces. For a rotor with a diameter of 1000 mm, the maximum number of blades should not exceed 10 units. The depth of the mass ejection nozzle should be taken into account the reserve coefficient equal to 1.1. A study of mass throwing by interchangeable rotor blades with their rounding in the range of the ratio of the diameter of the rounded blades to the diameter of the rotor equal to 0,6 – 0,9 showed that the optimal ratio d_r/D_p is 0,7 – 0,8. It provides a mass drop range of more than 20 m and a reduction in energy costs for throwing by one third of its value for straight blades. An equation for calculating the radii of the centers of the circles of rounding of the rotor blades is obtained, which has the form $R_r = 0,62 R_p$ for the ratio $d_r/D_p = 0,7 – 0,8$. The optimum radius of the centers of the circles of rounding of the blades provides an emission of more than 80% of the mass in the area of the pole of the exhaust pipe.

Key words: snow and ice mass, throwing, rotary thrower, clearing of snow-covered hummocks, curvature of the blades, ejection range, energy consumption for blowout.

FOR CITATION: Nikandrov I.S., Malygin A.L., Kulepov V.F., Shurashov A.D., Konopleva M.A., Krasnov Yu.V. Investigation of the throwing of crushed ice mass by a rotary thrower / Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 3. Pp. 112-119. EDN: GDSOTB

Введение

Значительный период года реки и озера Сибири и Дальнего Востока покрыты прочным ледовым покровом, который может быть использован для прокладки по ним надежных автомобильных трасс с использованием их также для судов на воздушной подушке, что требует удаления с поверхности льда торосовых образований и снежных наносов. Для очистки поверхности льда обычно используют шнековые фрезы. При этом снежно-ледовые образования измельчают шнековой фрезой и удаляют роторным метателем с будущей транспортной трассы. Стоимость перевозки по ледовой транспортной трассе в значительной мере определяется энергетическими затратами на ее подготовку и содержание. В связи с этим, оптимизация конструкции шнековой фрезы имеет важное практическое значение.

Основным рабочим органом роторного метателя является роторное колесо с лопатками захвата перемещаемого груза. Конструктивные особенности роторного метателя подробно описаны в работах [1-3].

Экспериментальная часть

Целью исследования стало определение влияния элементов конструкции лопаток основного рабочего элемента ротора (включая форму, радиус закругления, диаметр центров окружностей закругления) на энергетические затраты и дальность отбрасывания измельченной массы. Измельченную массу снежно-ледового образования готовили измельчением блока шнековой фрезой. Она содержала частицы размером менее 80 мм и имела температуру -17 °С. Удельный вес материала образцов составлял 480-510 кг/м³. После рассева образца на фракции по размеру частиц, оставшихся на сетке, получены следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1.

Удельный вес фракции снежно-ледовой массы

Table 1.

Specific gravity of the fraction of snow and ice mass

Размеры частиц, мм	< 1 мм	1-10	10-20	20-50	50-80
Удельный вес, кг/м ³	290	345	487	570	686
Массовая доля фракции, %	21,3	12,2	24,6	15,1	26,8

Использованный роторный метатель имел диаметр роторного диска 1000 мм, число лопаток, равное 8, ширину роторной лопатки 300 мм, число оборотов лопаток 350 об/мин. Сменные лопатки имели диаметры закругления с отношениями диаметра лопатки ($d_{\text{л}}$) к диаметру ротора равными 0,6-0,9. Разовая загрузка снежно-ледовой массы составляла 6,5 кг. Время загрузки составляло 4-6 сек. Материал подавали в нижнюю зону метателя через окно с приемным бункером в торцевой стенке корпуса метателя закрывающимся заслонкой.

Подаваемые частицы снежно-ледовой массы распределяются на тарелке и перемещаются вместе с тарелкой. При этом на частицу действуют одновременно сила тяжести (N_G) и

центробежная сила ($N_{ц}$). В точке загрузки они обе направлены вниз. Составляющая силы тяжести уравновешивающая центробежную силу при этом равна:

$$N_G = G \cdot \cos \rho \quad (1)$$

Центробежная сила равна:

$$N_{ц} = \frac{G \cdot v^2}{r \cdot q} \quad (2)$$

Критическая частота вращения ротора, когда силы противоположны, равна:

$$mq = m \left(\frac{\pi n_{кр}}{30} \right)^2 \cdot \frac{D_p}{2} \quad (3)$$

Отсюда:

$$n_{кр}^2 = \frac{2 \cdot 900 \cdot q}{\pi^2 D_p} \approx \frac{1800}{D_p}$$

Для $D_p = 1,0$ м:

$$n_{кр} = \sqrt{\frac{1800}{1}} = 45 \text{ об/мин}$$

Радиус окружностей центров закругления лопаток ($R_{ц}$) определяется уравнением:

$$R_{ц} = R_p - 0,5 R_{л} \quad (4)$$

Положение центра окружности конкретной лопатки берется по величине расстояния от точки пересечения прямой, длиной равной радиусу лопатки, взятой от края ротора в сторону закругления данной лопатки.

Конфигурация сечения лопаток ротора приведена на рис. 1.

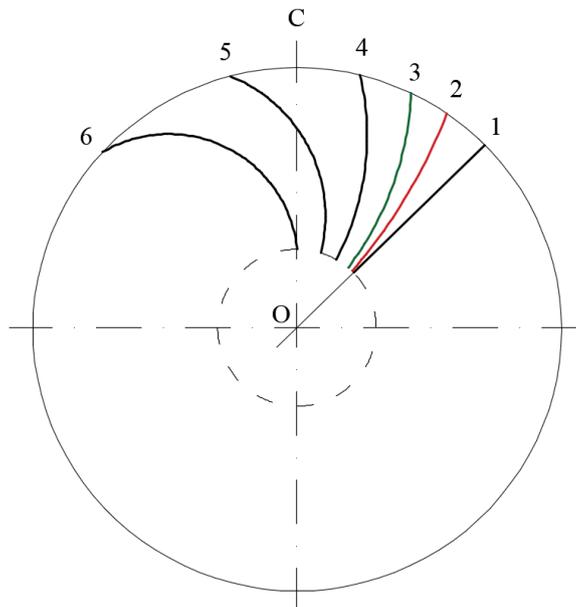


Рис. 1. Влияние соотношения $\frac{d_{л}}{D_p}$ на форму сечения закругленных лопаток:

радиус закругления лопаток ($R_{л}$) в долях от R_p

1 – 1(прямая); 2 – 0,9; 3 – 0,8; 4 – 0,7; 5 – 0,6; 6 – 0,5

Fig. 1. The effect of the $\frac{d_{л}}{D_p}$ ratio on the shape of the rounded blades:

the radius of rounding of the blades ($R_{л}$) in fractions of R_p

1 – 1(straight line); 2 – 0,9; 3 – 0,8; 4 – 0,7; 5 – 0,6; 6 – 0,5

Радиус центра окружностей лопаток меняется от бесконечности (для прямых лопаток) до соотношения радиуса закругления лопаток к радиусу ротора, равного 0,5. В случае применения прямых лопаток выброс массы начинается в момент приближения конца лопатки к началу патрубка выброса. При этом некоторые частицы выбрасываемой массы ударяются о стенки патрубка выброса и, теряя скорость, падают на нижележащую лопатку, увеличивая нагрузку на нее из-за повторного транспортирования частиц. При радиусе закругления лопаток 0,5 выгрузка ротора-метателя становится практически маловероятной, и метатель перестает выполнять свою функцию. Оптимум радиуса центра лопаток должен обеспечивать удаление массы из ротора-метателя вблизи точки полюса выброса, максимально исключая трение частиц о стенки патрубка выброса и многократный возврат выбрасываемой массы на нижерасположенные лопатки. Это обеспечивает снижение общих энергозатрат на удаление измельченной массы с очищаемой полосы трассы.

Разделение площади патрубка выброса на 5 параллельных секторов и замер массы выброса через каждый сектор путем отбора проб в каждом секторе при проведении параллельных опытов показало (рис. 2), что при использовании ротора с прямыми лопатками выброс проходит практически весь через первые два верхних сектора (линия 1). 60 % выброса массы приходится на первый сектор у верхнего края патрубка.

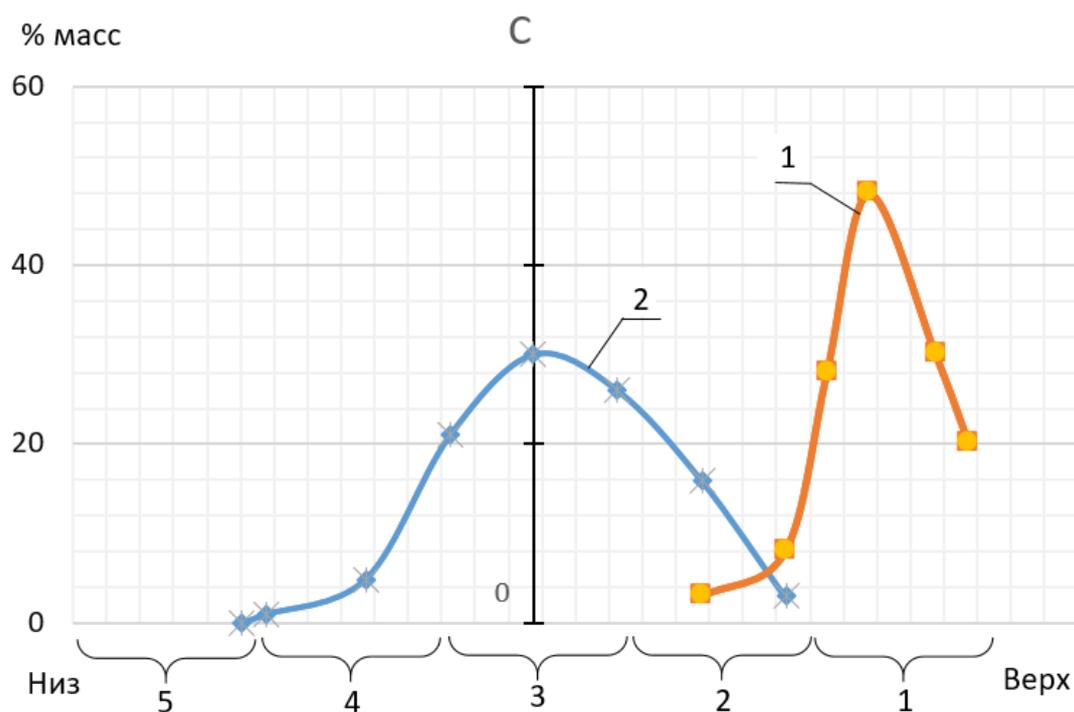


Рис. 2. Выброс массы по зонам патрубка выброса (% масс.)

Fig. 2. Mass ejection by zones of the ejection pipe (% mass.)

При использовании закругленной лопатки с соотношением $d_l/D_p = 0,75$ (линия 2) выброс массы до подхода лопатки к полюсу не превышает 47 %. В зоне полюса выброса удаляется еще 30 % массы.

Опыты показывают рациональность использования в роторном метателе закругленных лопаток. Подтверждена принятая нами гипотеза, что при выполнении лопатки в виде отрезка окружности большая часть материала может удерживаться на ней вплоть до момента пересечения лопаткой вертикали полюса ротора, хотя суммарный градиент сил, действующий

щих на частицу вверх, возникает значительно раньше этого момента. В результате практически полностью исключается пересыпание части груза на ниже расположенные тарелки.

Измельченный материал из-за обрушения свода льдин, находящихся на вершине торола разрушения, может частично содержать не до конца измельченные куски. Их линейный размер, как показывает практика, может составлять 140-160 мм. Количество таких кусков единично и не превышает 2 % от массы измельченного материала. Это позволяет считать измельченную снежно-ледовую массу, согласно принятым критериям [4], среднекусковым грузом (доля крупных кусков <10 %). Для него можно принять средний размер кусков равным $d = 0,8d_{max}$.

Аналогично винтовым конвейерам, ширина окна прохода материала в камеру метателя и пересыпания массы в пространстве камеры между лопатками должны быть не менее $2d_{max}$. При этом должно соблюдаться условие:

$$\frac{\pi(D_p - d_{max})}{n_l} \geq 1,6d_{max}$$

Отсюда максимальное число лопаток метателя (n_l) должно быть равно для $d_{max} = 160$ мм и $D_p = 1000$ мм.

$$n_l \leq \frac{\pi(D_p - d_{max})}{1,6d_{max}} \leq 10 \text{ единиц} \quad (5)$$

Размеры и наклон патрубка выброса массы из ротора определяется углом выброса массы (α_β) и углом результирующей силы действующей на витающую частицу (α_ν).

Ширину патрубка выброса следует принимать равной ширине камеры метателя (B).

Глубина патрубка выброса массы (B_2) принимается соответствующей прохождению лопаткой ($1/6\pi D_p$) части окружности диска ротора.

С учетом запаса необходимой глубины ($k_B = 1,1$) ее следует принять равной

$$B_2 = \frac{1}{6}\pi D_p \cdot k_B \geq 1,6d_{max} \quad (6)$$

Высоту патрубка (l_n) принимаем конструктивно равной 1-2 ширинам камеры ротора (B). Для выявления влияния кривизны лопаток на показатели процесса метания проведено испытание роторного метателя с лопатками различной закругленности.

В ходе испытаний нами замерялась дальность отброса массы от метателя и оценивалась по величине токовой нагрузки мощность, затрачиваемая на выброс. В работе использовали сменные лопатки с отношением $\frac{d_l}{D_p}$ равным от 0,6 до 1. Результаты опытов приведены на рис. 3.

Энергетические затраты ротора (N) складываются из расхода:

- на подъем груза (N_n);
- на преодоление движения и трения массы о стенки камеры (N_L);
- на механическое перемещение роторного диска (N_{xx}).

Погонная масса вращающихся частей ротора (q_ρ) с диаметром 1,0 м оценивается равной $q_\rho = 60D_\rho$. Высота подъема массы равна D_ρ , масса перемещается на расстояние $L = 0,5\pi D_p$ коэффициент трения равен μ . Площадь трения примерно равна $S_{тр} = B \cdot L$.

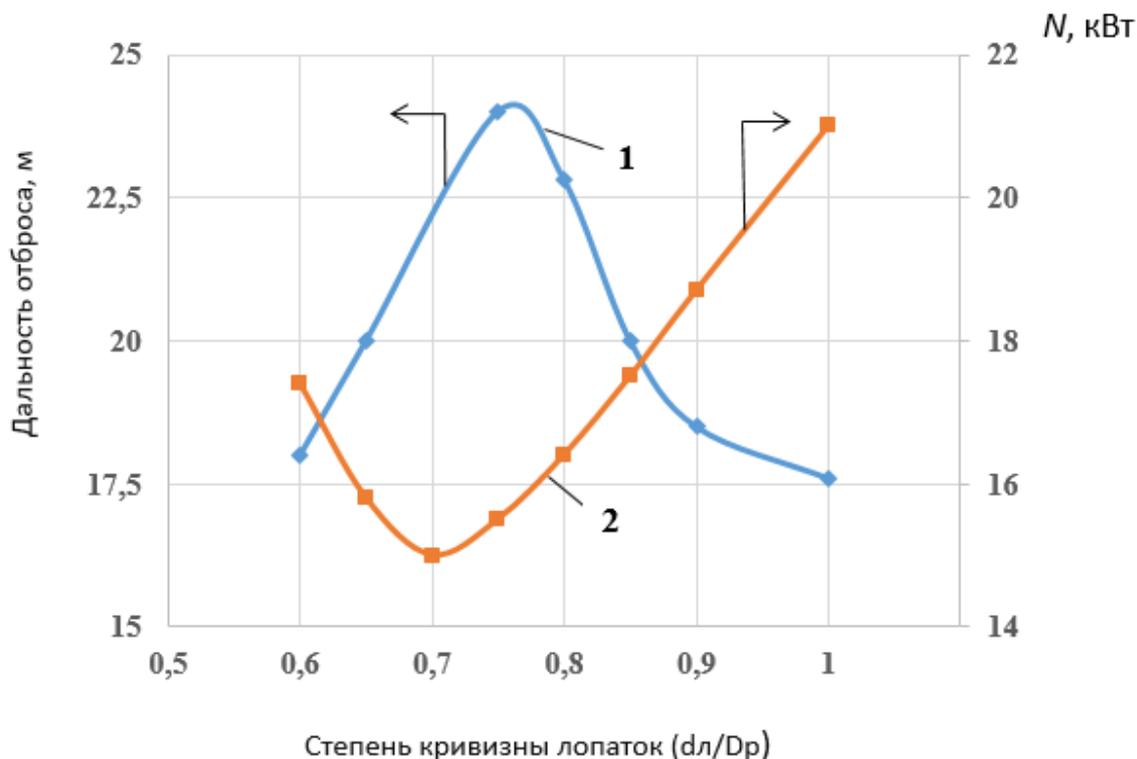


Рис. 3. Влияние степени кривизны лопаток на дальность метания измельченной снежно-ледовой массы (1) и мощность, затрачиваемую на ее выброс (2)

Fig. 3. The effect of the degree of curvature of the blades on the throwing range of the crushed snow and ice mass (1) and the power spent on its release (2)

Необходимая мощность ротора равна:

$$N = N_{\text{н}} + N_L + N_{\text{xx}}$$

$$N = \frac{Q_{\text{ш}} \cdot H \cdot g \cdot k_i}{3600} + \frac{2Q_{\text{ш}} \cdot g^2 \cdot \mu_{\text{ст}}}{3600 \cdot g \cdot \pi D_p \cdot B \cdot L} + 0,12 \cdot k_x \cdot q_p \cdot D_p \cdot V \cdot \omega_i \quad (7)$$

где: $Q_{\text{ш}}$ – производительность шнековой фразы (10 т/час);

ω_i – КПД пары подшипников вала ротора ($\omega = 0,01$);

k_i – коэффициент запаса мощности ($k_i = 1,15$);

k_x – коэффициент учета вращения ротора ($k_x = 0,2$);

μ – коэффициент трения массы по стали.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе для ротора диаметром 1 м определены геометрические параметры метателя равные: ширина лопаток 0,256 м, число лопаток 8-10 ед., частота вращения 300-350 об/мин, коэффициент заполнения камеры 0,1-0,2, толщина материала у стенки ~0,08 м, скорость выброса массы 11-15 м/сек, угол выброса 40-50°, дальность отброса 15-25 м.

Установлено уравнение положения центров окружностей закругления лопаток. Для $d_n = 0,7 - 0,8D_p$ радиус центров их равен $R_{\text{ц}} = 0,62R_p$.

Библиографический список

1. **Иванов, А.Н.** Создание новых отечественных дорожных снегоочистителей. Обзор / А.Н. Иванов, Л.И. Лившиц, Л.А. Скворцов и др. – М.: [б. и.], 1965. – 102 с.
2. **Шалман, Д.А.** Снегоочистители. Конструкции, теория и расчет / Д.А. Шалман. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1973. – 215 с.
3. **Карабан, Г.Л.** Машины для городского хозяйства / Г.Л. Карабан, В.И. Баловнев, И.А. Засов, Б.А. Лифшиц. – Москва: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. **Зенков, Р.Л.** Механика насыпных грузов (основания расчета погрузочно-разгрузочных и транспортных устройств) / Р.Л. Зенков. – М.: Машиностроение, 1964. – 251 с.

*Дата поступления
в редакцию: 28.01.2025*

*Дата принятия
к публикации: 25.06.2025*