

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОГРУЗКИ УПЛОТНЕННЫХ ГРУЗОВ

*Хакимзянов Р.Р., Маштаков А.П., Хакимзянов Р.Р.*

*Российский университет транспорта, Москва*

**Ключевые слова:** погрузчик непрерывного действия, питатель, рабочие органы, груз, траектория, производительность, энергоемкость.

**Аннотация.** На погрузочно-разгрузочных работах в настоящее время используется множество конструктивно-технологических схем погрузчиков непрерывного действия. Это связано с большим разнообразием перемещаемых грузов. Погрузчики имеют отличительные признаки, связанные с типом питателя, конструкцией рабочих органов, их количеством, характером движения, а также с видом деформации отделения частей груза от основного массива. Главным направлением обеспечения требуемой производительности при минимальной энергоемкости погрузочных машин является обоснование и оптимизация их параметров. В статье приводятся исследования характера движения груза на отдельных участках рабочих органов погрузчиков, с учетом особенностей свойств буртованных грузов. Отмечается, что путь, который проходит частица груза от места отделения до разгрузки на отгрузочный транспортер, оказывает непосредственное влияние на качественные показатели погрузки. Получено выражение для определения энергоемкости в зависимости от траектории движения груза, на каждом отдельном участке его перемещения.

## ANALYSIS OF THE ENERGY INTENSITY OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF LOADING COMPACTED CARGO

*Khakimzyanov R.R., Mashtakov A.P., Khakimzyanov R.R.*

*Russian University of Transport, Moscow*

**Keywords:** continuous loader, feeder, working bodies, cargo, trajectory, productivity, energy intensity.

**Abstract.** At present, many design and technological schemes of continuous loaders are used for loading and unloading operations. This is due to the large variety of transported goods. Loaders have distinctive features related to the type of feeder, the design of the working bodies, their number, the nature of movement, as well as the type of deformation of the separation of parts of the load from the main array. The main direction of ensuring the required performance with minimal energy consumption of loading machines is the justification and optimization of their parameters. The article presents studies of the nature of the movement of cargo on certain sections of the working bodies of loaders, taking into account the characteristics of the properties of the bundled cargo. It is noted that the path that a particle of cargo passes from the place of separation to unloading on the shipping conveyor has a direct impact on the quality indicators of loading. An expression is obtained for determining the energy intensity depending on the trajectory of the cargo movement, at each individual section of its movement.

**Введение.** Погрузчики являются необходимым звеном такого технологического процесса, как погрузка. Эффективность погрузчика решающим образом определяется работоспособностью его рабочих органов и режимами их взаимодействия с различными насыпными, связными и уплотненными грузами. Различие физико-механических свойств грузов, предопределило разработку множества конструктивно-технологических схем погрузчиков, приспособленных, как правило, к определенному грузу [1].

Исследование характера движения груза на отдельных участках, с учетом особенностей свойств буртованных грузов позволит получить выражение для определения энергоемкости в зависимости от траектории движения груза на каждом участке.

Каждый из указанных этапов характеризуется частной математической моделью, которая включает в себя как внешние, так и внутренние факторы. Мощность, необходимая на перемещение груза на каждом участке, зависит от режимных, конструктивных параметров погрузчика, физико-механических свойств груза, и от характера его движения, т.е. траектории, задаваемой конструктивными и режимными параметрами рабочих органов [2].

Анализ технологического процесса погрузки буртованных грузов погрузчиками непрерывного действия, позволил получить траекторию движения груза с момента захвата или отделения до разгрузки в транспортное средство. При работе со связными грузами, рационально использовать питатели роторного типа с отделяющими элементами. Причем последние, могут быть как в составе независимого отделяющего рабочего органа, так и быть одним целым с транспортирующим. Рассмотрим взаимодействие рабочих органов с грузом на примере шнекороторного питателя (рис. 1) [3].

Траектория движения груза, задаваемая рабочими органами данного питателя, будет сложной, зависящая от частоты вращения и диаметра шнека, поступательной скорости погрузчика. Кроме того, на характер движения груза оказывает влияние наличие в питателе отделяющих элементов, их количество, способ установки и т.д. При перемещении груза только шнековым питателем, в соответствии с рисунком 1, траектория его будет колебательной, однако наличие в питателе отделяющих элементов приводит к тому, что помимо колебательного движения груз дополнительно перемещается по сложной спиральной траектории [4].

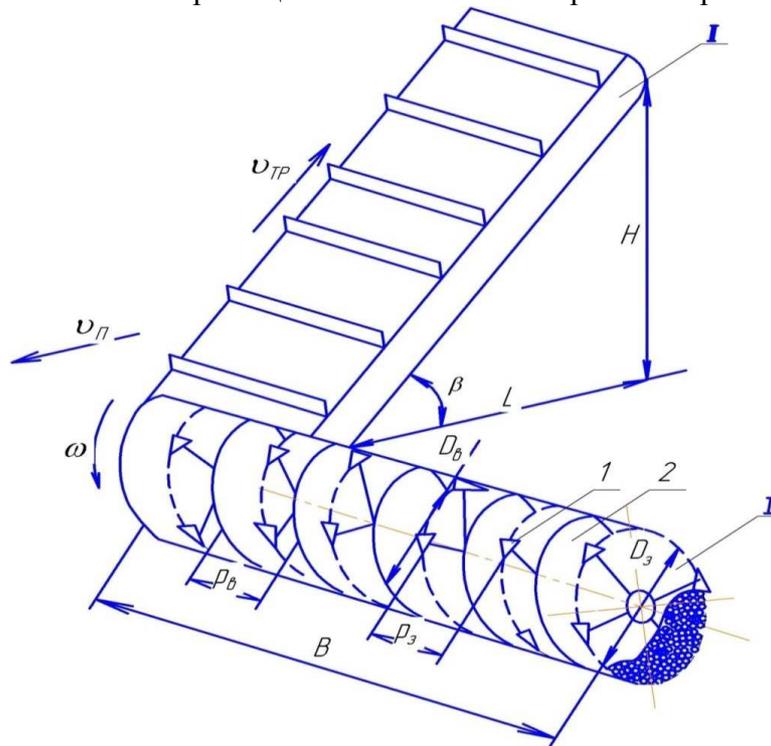


Рис. 1. Схема погрузчика связных грузов: I – шнекофрезерный питатель; II – отгрузочный транспортер; 1 – режущий зуб; 2 – шнек

**Материалы и методы исследований.** Отделяющие элементы вместе с полезной работой – отделение груза от основного массива – оказывают и дополнительное сопротивление перемещению груза, внедряясь в уже отделенный материал и перемешивая его. Это ведет к затратам мощности на привод рабочих органов погрузчика [5].

Определим энергоёмкость процесса погрузки связных грузов погрузчиком с шнекофрезерным питателем, с учетом длины траектории движения груза (рис. 2, 3):  $S_1$  – траектории движения груза, задаваемой отделяющими элементами, м;  $S_2$  – траектории движения груза, задаваемой шнеком, м;  $S_3$  – траектории движения груза между питателем и отгрузочным транспортером, м;  $S_4$  – траектории движения груза, задаваемой отгрузочным транспортером, м.

$$E_{C_6} = \frac{(P_{отд} + P_{тр.шт} + P_M + P_{отгр})}{Q_1}, \quad (1)$$

где  $E_{C_6}$  – энергоёмкость погрузки связных грузов, Дж/кг;  $P_{отд}$  – мощность, затрачиваемая на отделение груза питателем, Вт;  $P_{тр.шт}$  – мощность, затрачиваемая на транспортирование

груза питателем, Вт;  $P_M$  – мощность, затрачиваемая на загрузку транспортера, Вт;  $P_{отгр}$  – мощность, затрачиваемая на привод отгрузочного транспортера, Вт;  $Q_1$  – производительность питателя, кг/с.

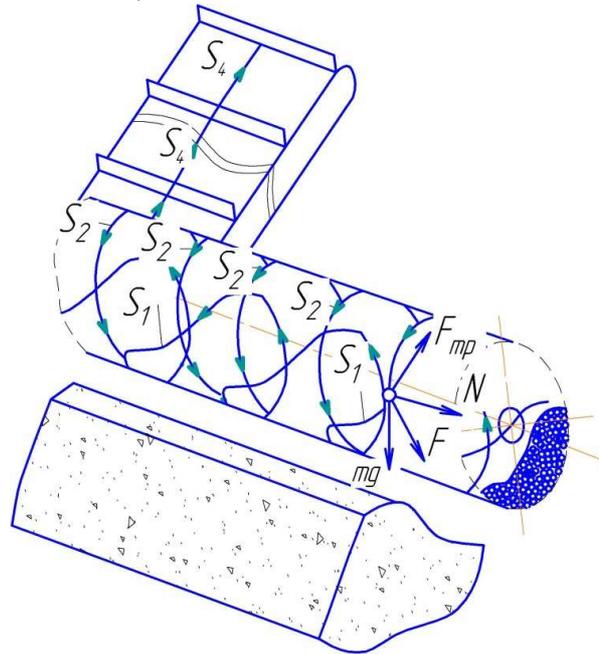


Рис. 2. Траектория движения груза перемещаемого шнекофрезерным погрузчиком связных грузов:  
1 – шнекофрезерный питатель, 2 – транспортер

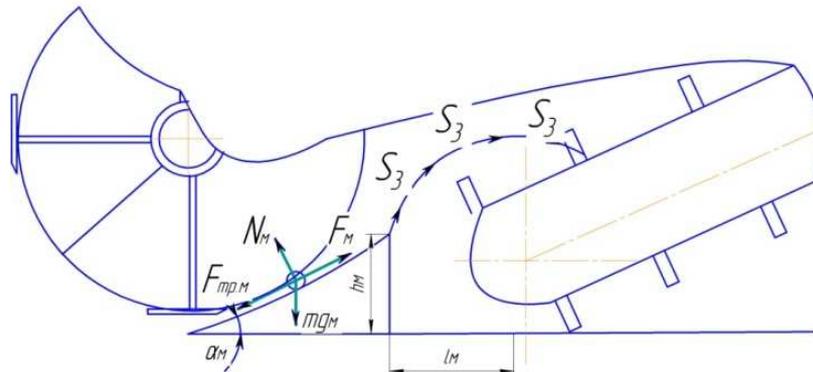


Рис. 3. Траектория движения груза  $S_3$ , задаваемая режущими зубьями и шнеком погрузчика связных грузов

Мощность, затрачиваемая на отделение груза питателем, определится по выражению [6]:

$$P_{отд} = \frac{B}{p_3} \frac{z_{II}}{2} \sigma_p b h \sin\left(\varphi_{тр} + \frac{\gamma}{2}\right) S_1 \frac{\omega}{\pi}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина захвата питателя, м;  $b$  – ширина зуба, м;  $h$  – толщина режущей кромки, м;  $\varphi_{тр}$  – угол трения связного груза по стали, град;  $\gamma$  – угол клина зуба, град;  $\omega$  – угловая скорость вращения питателя, рад/с;  $z_{II}$  – половина числа зубьев, установленных и вращающихся в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения питателя, шт;  $\sigma_p$  – напряжение резания связного груза, кПа;  $p_3$  – шаг установки зубьев, м;  $S_1$  – траектория движения груза, задаваемая, режущими зубьями, м.

Мощность, затрачиваемая на транспортирование груза, питателем:

$$P_{тр.пит} = \frac{\left[ f_2 (g \cos \varepsilon + R_B \omega^2) + \frac{\omega^2 R_B}{\varphi_{раз}} + g f_{BH} \right] m k_{fB} k_{mp} \omega z_{\varepsilon} \sqrt{\frac{S_2^2 - \left(\frac{B}{z_{\varepsilon}}\right)^2}{39,4}}}{\sin \alpha - f_1 \cos \alpha}, \quad (3)$$

где  $f_2$  – коэффициент трения груза о кожух;  $\varepsilon$  – угол положения точки относительно вертикальной оси;  $R_6$  – наружный радиус винта, м;  $\omega$  – угловая скорость питателя, рад/с;  $\varphi_{раз}$  – угол разгона груза, рад;  $f_{вн}$  – коэффициент внутреннего трения груза;  $m$  – масса частиц груза, кг;  $K_{fB}$  – коэффициент, учитывающий силу внутреннего трения груза и силу, дополнительно прижимающую груз к кожуху;  $k_{мп}$  – коэффициент, учитывающий отклонения в движении груза от прямолинейного;  $z_B$  – количество витков питателя, шт;  $\alpha$  – угол подъема винтовой линии;  $f_1$  – коэффициент трения груза о винт;  $B$  – ширина захвата питателя, м,  $B = L_r$  – длина горизонтальной части транспортера, м [7].

Мощность, затрачиваемая на загрузку транспортера [8]:

$$P_m = \left[ \frac{S_3}{t^2} + g (\sin \alpha_m + f \cos \alpha_m) \right] \rho V v, \quad (4)$$

где  $\sigma_m$  – угол подъема порции груза, град;  $f$  – коэффициент трения;  $\rho$  – плотность груза, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем перемещаемого груза, м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость движения частицы груза, м/с.

Мощность, затрачиваемая на привод отгрузочного транспортера, определится по выражению [9]:

$$P_{отгр} = Q_2 g k_u (S_4 k_c \cos \beta + H), \quad (5)$$

где  $Q_2$  – производительность отгрузочного транспортера, кг/с;  $k_u$  – коэффициент, учитывающий потери мощности при пуске;  $H$  – высота подъема груза отгрузочным транспортером, м;  $k_c$  – коэффициент сопротивления движению;  $\beta$  – угол установки транспортера, град.

В свою очередь производительность питателя определится:

$$Q_1 = \left( R_p^2 \frac{\omega t}{2} - \frac{R_p^2}{4} \sin(2\omega t) + \frac{v_n R_p}{\omega} \cos(\omega t) \right) \frac{k_o b \rho z_t \omega}{\pi}, \quad (6)$$

где  $R_p$  – радиус питателя по режущим зубьям, м;  $v_n$  – поступательная скорость погрузчика, м/с;  $\rho$  – плотность груза, кг/м<sup>3</sup>;  $k_o$  – коэффициент заполнения рабочего объема;  $z_t$  – число зубьев одновременно отделяющих связный груз от бурта, шт.

Производительность отгрузочного транспортера  $Q_2$  должна быть больше производительности  $Q_1$  и определяется по известным методикам [10].

**Результаты.** Минимальное значение энергоемкости (рис. 4, 5) погрузчика с шнекофрезерным питателем при погрузке связных грузов составит 340..360 Дж/кг при частоте вращения шнека 0,8...0,9 с<sup>-1</sup> и при длине траектории движения груза 17 метров. Длина траектории перемещения груза при данной конструктивно-технологической схеме определится по выражению:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \quad (7)$$

$$S = z_3 \sqrt{p_3^2 + (\pi D_3)^2} + z_6 \sqrt{p_6^2 + (\pi D_6)^2} + \frac{l_m t}{\cos \alpha_m \sqrt{\frac{2(l_m \operatorname{tg} \alpha_m + h)}{g}}} + \sqrt{L^2 + H^2}, \quad (8)$$

где  $S$  – траектория движения груза с момента отделения до разгрузки в транспортное средство, м;  $S_4$  – траектория движения груза, задаваемая отгрузочным транспортером, м;  $z_6$  – количество витков шнека, шт;  $p_6$  – шаг витков шнека, м;  $D_6$  – диаметр шнека, м;  $z_3$  – количество витков режущих зубьев, шт;  $D_3$  – диаметр питателя по режущим зубьям, м;  $l_m$  – расстояние между питателем и отгрузочным транспортером, м;  $h$  – высота подъема порции груза, м;  $L$  – длина транспортера в горизонтальной плоскости, м.

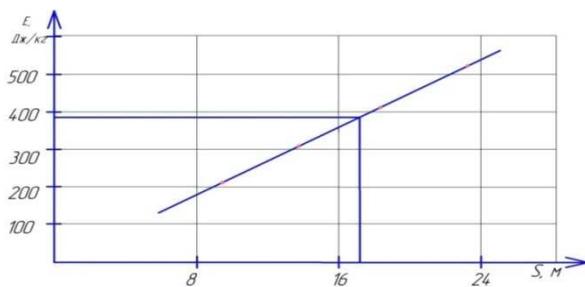


Рис. 4. Зависимость энергоёмкости процесса погрузки связных грузов от длины траектории движения груза

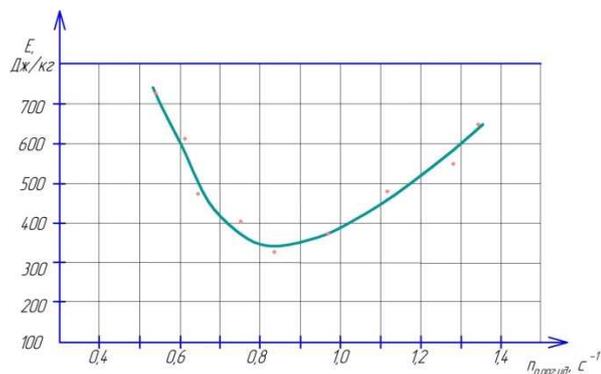


Рис. 5. Зависимость энергоёмкости процесса погрузки органических удобрений от частоты вращения питателя

**Заключение.** Таким образом, энергоёмкость процесса погрузки буртованных насыпных, уплотнённых и связных грузов будет зависеть от траектории движения груза от места отделения или захвата и до места разгрузки. Путь, который проходит частица груза, взаимодействуя с рабочими органами, будет зависеть от их конструктивного исполнения и режимных параметров.

#### Список литературы

1. Khakimzyanov R.R., Mashtakov A.P. Kinematic and force analysis of a bucket frontlift // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 548(6), p.062011. DOI: 10.1088/1755-1315/548/6/062011.
2. Павлов П.И., Везиров А.О., Павлов И.П. Экспериментальное исследование влияния режима работы погрузчика корнеклубнеплодов с лопастным питателем на крутящий момент на валу рабочего органа // Естественные и технические науки. – 2022. – № 9(172). – С. 108-110.
3. Алешков Д.С., Корчагин П.А., Тетерина И.А. Исследование работы физических моделей вертикального и горизонтального питателей снегоочистителя // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2022. – №16. – С. 56-61.
4. Павлов П.И., Корсак В.В., Павлов И.П., Дзюбан И.Л. Экспериментальное исследование производительности погрузчика корнеклубнеплодов с лопастным питателем // Аграрный научный журнал. – 2022. – № 10. – С. 108-110.
5. Закиров М.Ф. Определение затрат мощности на привод фрезерного питателя малогабаритного снегоочистителя // Механизация строительства. – 2016. – Т. 77, № 10. – С. 53-56.
6. Mashtakov A.P., Khakimzyanov R.R. The load allocation along the loader axles depending on operating conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 548(5), p. 052044. DOI:10.1088/1755-1315/548/5/052044.
7. Везиров А.О., Павлов П.И., Левченко А.В., Корсак В.В. Влияние конструктивных и режимных параметров на силовые характеристики машины для удаления и погрузки тепличного грунта // Вестник Курганской ГСХА. – 2021. – № 4(40). – С. 53-58.
8. Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V. High Frequency Vibrations in the Elements of the Rolling Stock on the Railway Bridges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 463(3), p. 032019. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032019.
9. Khakimzyanov R.R., Mashtakov A.P. The combination feeder of a continuous-action loader for the bulk load // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 862(3), p. 032018. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032018.
10. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: Учебное пособие для машиностроительных вузов. – 3-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1983. – 487 с.

#### References

1. Khakimzyanov R.R., Mashtakov A.P. Kinematic and force analysis of a bucket frontlift // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 548(6), p.062011. DOI: 10.1088/1755-1315/548/6/062011.
2. Pavlov P.I., Vezirov A.O., Pavlov I.P. Experimental study of the effect of the operating mode of a loader of root crops with a paddle feeder on the torque on the shaft of the working // Natural and technical Sciences. 2022, no. 9(172), pp. 108-110.
3. Aleshkov D.S., Korchagin P.A., Teterina I.A. Investigation of the work of physical models of vertical and horizontal snowplow feeders // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2022, no. 16, pp. 56-61.

4. Pavlov P.I., Korsak V.V., Pavlov I.P., Dzyuban I.L. Experimental study of the productivity of a loader of root crops with a paddle feeder // Agrarian Scientific journal. 2022, no. 10, pp. 108-110.
5. Zakirov M.F. Determination of power costs for the drive of the milling feeder of a small-sized snowplow // Mechanization of construction. 2016, vol. 77, no. 10, pp. 53-56.
6. Mashtakov A.P., Khakimzyanov R.R. The load allocation along the loader axles depending on operating conditions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, vol. 548(5), p. 052044. DOI:10.1088/1755-1315/548/5/052044.
7. Vezirov A.O., Pavlov P.I., Levchenko A.V., Korsak V.V. The influence of design and operating parameters on the power characteristics of a machine for removing and loading greenhouse soil // Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy. 2021, no. 4(40), pp. 53-58.
8. Loktev A.A., Korolev V.V., Shishkina I.V. High Frequency Vibrations in the Elements of the Rolling Stock on the Railway Bridges // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 463(3), p. 032019. DOI: 10.1088/1757-899X/463/3/032019.
9. Khakimzyanov R.R., Mashtakov A.P. The combination feeder of a continuous-action loader for the bulk load // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 862(3), p. 032018. DOI: 10.1088/1757-899X/862/3/032018.
10. Spivakovsky A.O., Dyachkov V.K. Transporting machines: Textbook for machine-building universities. – 3rd ed., reprint. – M.: Mechanical Engineering, 1983. – 487 p.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Хаки́мзянов Ру́стам Рафи́тович</b> – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортное строительство»	<b>Khakimzyanov Rustam Rafitovich</b> – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of “Transport construction”
<b>Маштаков Александр Петрович</b> – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теоретическая и прикладная механика»	<b>Mashtakov Alexander Petrovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of theoretical and applied mechanics
<b>Хаки́мзянов Рома́н Ру́стамович</b> – студент khakrr@yandex.ru	<b>Khakimzyanov Roman Rustamovich</b> – student

Получена 30.11.2022