

Научная статья

УДК 625.76.08 : 625.768.5

Исследование и оптимизация технологических параметров процесса поступательно-вращательного прессования металлических отходов

Никита Михайлович Андрухов¹, Геннадий Владимирович Кустарев²,
Роман Геннадиевич Данилов³, Андрей Владимирович Стасюк⁴

^{1,4}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

^{1,2}Российская инженерная академия (РИА), Москва, Россия

³Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный
и автомоторный институт «НАМИ», Москва, Россия

^{1,4}nikita999-082@mail.ru

²proektdm@mail.ru

³r.danilov@nami.ru

Аннотация. Эффективность всей системы обращения с отходами в значительной степени определяется корректностью организации ее первичных стадий – накопления и транспортировки твердых коммунальных отходов (ТКО). Именно от этих процессов зависят экологические риски, общие финансовые издержки и потенциал для вторичного использования ресурсов. Ключевым условием для глубокой переработки является организация селективного (раздельного) сбора. В этой связи совершенствование специализированной техники – мусоровозов для раздельного сбора, направленное на повышение их производительности и рентабельности, представляет собой одну из насущных задач для муниципальных служб. В данной работе исследуются технологии уплотнения металлосодержащих фракций отходов, включая перспективный метод, планируемый к внедрению в конструкции новых мусоровозов. Применение поступательно-вращательного воздействия позволяет достичь более высокой плотности прессования металлического лома и уменьшить его остаточную упругость по сравнению с традиционным линейным прессованием.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, металлические отходы, кузовной мусоровоз, коэффициент уплотнения, пластические деформации, экспериментальный стенд, поступательное уплотнение, поступательно-вращательное уплотнение.

Для цитирования: Андрухов Н.М., Кустарев Г.В., Данилов Р.Г., Стасюк А.В. Исследование и оптимизация технологических параметров процесса поступательно-вращательного прессования металлических отходов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

Research and optimization of technological parameters of the translational-rotational pressing process of metal waste

Nikita M. Andriukhov¹, Gennady V. Kustarev², Roman G. Danilov³, Andrey V. Stasyuk⁴

^{1,4}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

^{1,2}Russian Engineering Academy (RIA), Moscow, Russia

³Central Order of the Red Banner of Labor Scientific Research Automobile and Motor Institute "NAMI", Moscow, Russia

^{1,4}nikita999-082@mail.ru

²proektdm@mail.ru

³r.danilov@nami.ru

Abstract. The effectiveness of the entire waste management system is largely determined by the correct organization of its initial stages, such as the accumulation and transportation of municipal solid waste (MSW). These processes play a crucial role in determining environmental risks, overall financial costs, and the potential for resource recycling. The key to successful recycling is the implementation of selective (separate) collection. Therefore, improving the specialized equipment used for separate collection, such as waste collection vehicles, to enhance their efficiency and profitability is a pressing task for municipal services. This paper explores the technologies of compaction of metal-containing waste fractions, including a promising method that is planned to be implemented in the design of new garbage trucks. The use of translational-rotational impact allows for achieving higher density of metal scrap pressing and reducing its residual elasticity compared to.

Keywords: municipal solid waste, metal waste, body-mounted garbage truck, compaction factor, plastic deformations, experimental stand, translational compaction, translational-rotational compaction.

For citation: Andriukhov N.M., Kustarev G.V., Danilov R.G. Stasyuk A.V. Research and optimization of technological parameters of the translational-rotational pressing process of metal waste. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. № 1 (47).

Введение

Одним из приоритетов для современных крупных городов является повышение эффективности системы обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) [1]. Данная система включает множество этапов, причем наиболее затратным из них с эксплуатационной точки зрения является сбор и доставка ТКО на места их обработки. Основная доля этих расходов связана с

использованием мусоровозного транспорта, от продуктивности которого в значительной мере зависят как экономические показатели, так и экологические последствия всего процесса утилизации. Внедрение отдельного сбора ТКО представляет собой важное условие для их последующей переработки. В составе отдельно собранных фракций особое место занимают металлические отходы. Ключевым фактором, определяющим эффективность работы мусоровоза, выступает механизм уплотнения отходов в кузове, поскольку от степени сжатия напрямую зависят производительность и себестоимость транспортировки. Существующая проблема заключается в трудностях с уплотнением плохопрессуемых металлических компонентов. В качестве решения была разработана инновационная система прессования, основанная на поступательно-вращательном воздействии. Добавление вращательного усилия позволяет не только эффективнее уплотнять, но также измельчать и равномерно распределять отходы по объему кузова.

Экспериментальная часть

Согласно данным исследований [2], применение комбинированного (поступательно-вращательного) метода прессования обеспечивает более значительный рост плотности отходов в сравнении с традиционным линейным воздействием. Эксперименты по изучению данного процесса выполнялись на специализированном стенде, где в качестве моделируемого материала использовались металлические отходы. В ходе испытаний была установлена зависимость степени уплотнения $K_{упл}$ от механического напряжения σ (кПа), возникающего в массиве отходов под действием как поступательного, так и поступательно-вращательного усилия. Одной из целей эксперимента являлось определение модуля деформации для ТКО. Для последующего математического моделирования изменения данного модуля было выполнено дифференцирование уравнения аппроксимирующей кривой, построенной по результатам экспериментальных замеров [3]. В камеру уплотнения стенда загружались металлические отходы, представленные алюминиевыми банками

емкостью 0,5 литра, а также жестяными банками из-под консервов, что отображено на рис. 1.



Рис. 1. Металлические отходы в камере уплотнения

В ходе испытаний осуществлялось уплотнение металлических отходов. На рисунке 2 представлены результаты этого процесса, а именно отходы, спрессованные плитой, совершающей комбинированное поступательно-вращательное движение.



Рис. 2. Уплотнение металлических отходов при поступательно-вращательном движении

Анализ результатов сравнительных испытаний двух методов уплотнения – поступательного и комбинированного (поступательно-вращательного) – показал положительную динамику. Модуль деформации

снизился с 26,8 кПа до 21,4 кПа, что соответствует уменьшению на 20,03% [4, 5]. Это объясняется свойством пластичности, характерным для металлических отходов: после снятия нагрузки они не восстанавливают первоначальный объем, сохраняя достигнутой при уплотнении форму. Зависимость степени уплотнения от механического напряжения в среде отходов графически представлена на рис. 3.

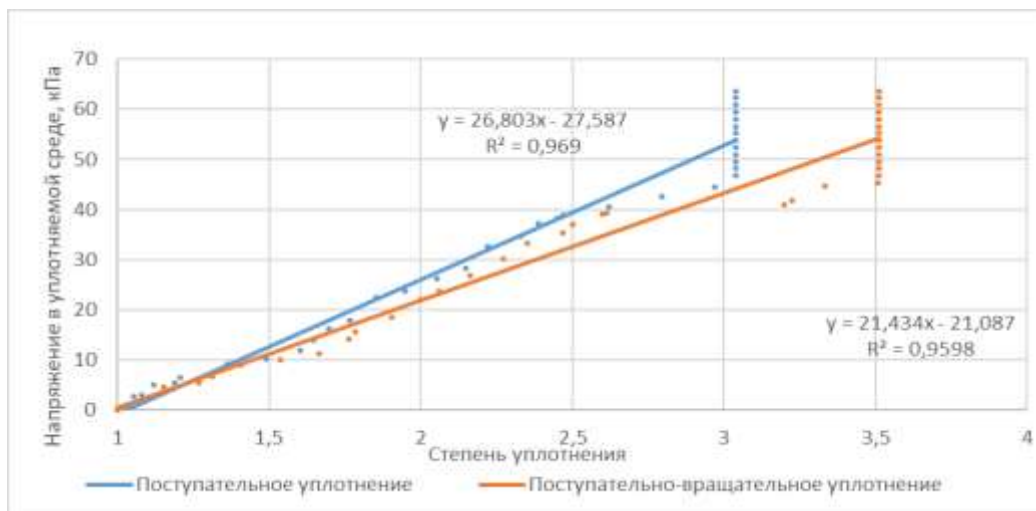


Рис. 3. Отношение степени уплотнения металлических отходов от напряжения

При поступательном уплотнении металлических отходов получена функция зависимости напряжения от степени уплотнения (1–2).

$$\sigma = 26,803 * K_{\text{упл}} - 27,587; \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}(K_{\text{упл}}) = 26,803 = E. \quad (2)$$

При поступательно-вращательном уплотнении металлических отходов получена функция зависимости напряжения от степени уплотнения (3–4).

$$\sigma = 21,434K_{\text{упл}} - 21,087; \quad (3)$$

$$\dot{\sigma}(K_{\text{упл}}) = 21,434 = E. \quad (4)$$

В результате экспериментальных исследований были определены предельные значения коэффициентов уплотнения для поступательного и комбинированного (поступательно-вращательного) методов (табл. 1), а также установлены значения модулей деформации пластиковых отходов при каждом из этих способов (рис. 4). Внедрение касательной (вращательной)

составляющей в процесс прессования доказало свою эффективность, выразившуюся в увеличении степени уплотнения и одновременном снижении модуля деформации материала.

Таблица 1

Результаты испытаний при поступательном и поступательно-вращательном уплотнении металлических отходов

Метод уплотнения	Изначально занимаемый объем отходов, л	Занимаемый объем после уплотнения, л	Степень уплотнения	Модуль деформации, кПа
Поступательное движение плиты	26,85	8,83	3,04	26,803
Поступательно-вращательное движение плиты	28,26	8,05	3,51	21,434

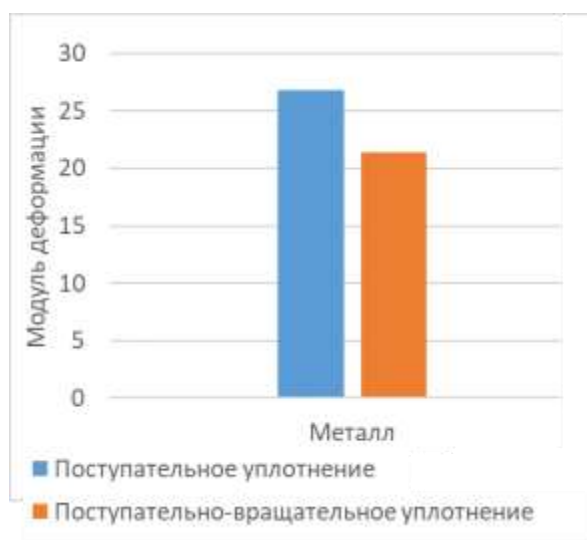


Рис. 4. Диаграмма сравнения модулей деформации при поступательном и поступательно-вращательном уплотнении в ходе экспериментов на стенде для определения параметров уплотнения отходов

Выводы

На основании проведенного анализа и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы. Внедрение системы поступательно-вращательного уплотнения в кузовах мусоровозов представляет собой технически обоснованное и экономически целесообразное

направление модернизации коммунальной техники. Ключевым преимуществом данного метода перед традиционным поступательным прессованием является достижение более высокого коэффициента уплотнения, особенно для трудносжимаемых фракций, таких как металлические и пластиковые отходы. Экспериментально подтверждено, что комбинированное воздействие не только увеличивает плотность отходов, но и приводит к существенному снижению их модуля деформации, что предотвращает разуплотнение при транспортировке. Дополнительный вращательный момент способствует более равномерному распределению и предварительному измельчению материала в объеме кузова, оптимизируя использование его полезной емкости. В результате повышается производительность каждого рейса, снижаются эксплуатационные затраты на логистику и топливо, что в совокупности усиливает как экономическую, так и экологическую эффективность всей системы управления твердыми коммунальными отходами. Наиболее перспективным является применение данной системы для мусоровозов, обслуживающих раздельный сбор «сухих» вторичных ресурсов, где требуется максимальное уплотнение без потери качества сырья для последующей переработки. Таким образом, совершенствование узла уплотнения на основе поступательно-вращательного принципа является актуальным шагом для развития городской инфраструктуры и перехода к экономике замкнутого цикла.

Список источников

1. Машины для сбора и вывоза твёрдых бытовых отходов. Устройство, основы расчёта : учебное пособие / В. И. Баловнев, Г. В. Кустарев, Р. Г. Данилов, Н. М. Андрюхов. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. – 164 с. – EDN OZVVKZ.
2. Андрюхов, Н. М. Обоснование и разработка системы поступательно-вращательного действия для повышения степени уплотнения твердых коммунальных отходов и производительности мусоровозов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Андрюхов Никита Михайлович, 2023. – 154 с. – EDN GMEUXZ.

3. Анализ конструкций кузовных мусоровозов / И. А. Яковлев, Р. В. Каргин, Е. А. Шемшур, Д. Р. Каргина // Интернет-журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8, № 6(37). – С. 163. – EDN XXYNZH.

4. Айрапетов, С. Н. Отечественный или импортный мусоровоз? Какой выбрать? / С. Н. Айрапетов // Твердые бытовые отходы. – 2012. – № 8(74). – С. 29-31. – EDN PAWFAN.

5. Даценко, В. М. Расширение функциональных возможностей мусоровозов с боковой загрузкой путем применения грейферного захвата / В. М. Даценко, А. А. Гербутов, В. В. Зубова // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 187-196. – EDN NVZTKG.

6. Гульняшкин, А. В. Требования к современному мусоровозу / А. В. Гульняшкин, Д. А. Иванов, П. С. Федусенко // Твердые бытовые отходы. – 2013. – № 10(88). – С. 56-57. – EDN RJFUEJ.

7. Сулейманов, Э. С. Повышение экономической эффективности использования мусоровозов за счет оптимизации технологического режима эксплуатации / Э. С. Сулейманов, Э. Д. Умеров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 4(78). – С. 159-164. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.78.4.032. – EDN CFPZVF.

8. Сокращение издержек при вывозе твердых бытовых отходов путем оптимизации маршрутов движения мусоровозов и учета параметров загрузки / Н. В. Лобов, М. Ю. Петухов, Н. И. Фомина, А. Н. Сухорученко // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С. 12-16. – EDN MVXKNP.

9. Белоцерковский, А. Г. Мусоровоз с задней загрузкой кузова и краноманипулятором / А. Г. Белоцерковский, Г. М. Белоцерковский // Твердые бытовые отходы. – 2011. – № 4(58). – С. 40-41. – EDN NEAILN.

10. Байкова, Т. П. Современные мусоровозы: максимальная эффективность при минимальных расходах / Т. П. Байкова // Твердые бытовые отходы. – 2010. – № 2(44). – С. 52-53. – EDN NTTCFB.

References

1. Balovnev V.I., Kustarev G.V., Danilov R.G., Andriukhov N.M. *Mashiny dlya sbora i vyvoza tvordykh bytovykh otkhodov. Ustroystvo, osnovy raschota* (Machines for collecting and removing solid household waste. The device, the basics of calculation), Moscow, Moskovskiy avtomobil'no-dorozhnyy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet (MADI), 2022, 164 p.

2. Andriukhov N.M. *Obosnovaniye i razrabotka sistemy postupatel'no-vrashchatel'nogo deystviya dlya povysheniya stepeni uplotneniya tverdykh kommunal'nykh otkhodov i proizvoditel'nosti musorovozov* (Substantiation and development of a translational-rotational action system to increase the degree of compaction of municipal solid waste and productivity of

garbage trucks), Candidate's thesis, Moscow, MADI, 2023, 154 p.

3. Yakovlev I.A., Kargin R.V., Shemshura Ye.A., Kargina D.R. *Internet-zhurnal Naukovedeniye*, 2016, vol. 8, no. 6(37), p. 163.

4. Ayrapetov S.N. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2012, no. 8(74), pp. 29-31.

5. Datsenko V.M., Gerbutov A.A., Zubova V.V. *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 187-196.

6. Gul'nyashkin A.V., Ivanov D.A., Fedusenko P.S. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2013, no. 10(88), p. 56-57.

7. Suleymanov E.S., Umerov E.D. *Uchenyye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2022, no. 4(78), pp. 159-164, doi 10.34771/UZCEPU.2022.78.4.032.

8. Lobov N.V., Petukhov M.Yu., Fomina N.I., Sukhoruchenko A.N. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2010, no. 2, pp. 12-16.

9. Belotserkovskiy A.G., Belotserkovskiy G.M. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2011, no. 4(58), pp. 40-41.

10. Baykova T. P. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2010, no. 2(44), pp. 52-53.

Рецензент: О.Ю. Улитич, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Андрюхов Никита Михайлович, канд. техн. наук, доц., МАДИ;
член-корр., Российская Инженерная Академия.

Кустарев Геннадий Владимирович, канд. техн. наук, вице-президент,
Российская Инженерная Академия.

Данилов Роман Геннадиевич, канд. техн. наук, начальник отдела, ФГУП «НАМИ».
Стасюк Андрей Владимирович, аспирант, МАДИ.

Information about the authors

Andriukhov Nikita M., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI;
Corresponding Member, Russian Engineering Academy.

Kustarev Gennady V., Candidate of Sciences (Technical), associate professor,
Vice President, Russian Engineering Academy.

Danilov Roman G., Candidate of Sciences (Technical), Head of the Department, FSUE NAMI.
Stasyuk Andrey V., postgraduate student, MADI.

Статья поступила в редакцию 23.12.2025; одобрена после рецензирования 21.01.2026; принята к публикации 19.03.2026.

The article was submitted 23.12.2025; approved after reviewing 21.01.2026; accepted for publication 19.03.2026.