

Научная статья

УДК 625.76.08 : 625.768.5

Исследование осевого и комбинированного уплотнения пластиковых отходов

Никита Михайлович Андрухов¹, Геннадий Владимирович Кустарев²,
Роман Геннадиевич Данилов³

¹Московский 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

¹nikita999-082@mail.ru

²proektdm@mail.ru

³r.danilov@nami.ru

Аннотация. Сбор и транспортировка твердых коммунальных отходов являются критически важными начальными этапами всей системы управления отходами. От их эффективной организации зависят экологическая безопасность, экономические затраты и возможность последующей переработки. Раздельный сбор отходов является одним из важнейших путей для их дальнейшей переработки. Совершенствование кузовных мусоровозов, предназначенных для раздельного сбора отходов, повышение их эффективности и экономичности является актуальной и важной задачей городского хозяйства. В статье рассматриваются методы уплотнения отходов из пластика, в том числе новый метод, который в ближайшей перспективе будет использоваться в конструкции мусоровозов. Комбинированное уплотнение обеспечивает более высокий коэффициент уплотнения пластиковых отходов и снижение модуля упругости по сравнению с поступательным уплотнением.

Ключевые слова: пластиковые 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. Исследование осевого и комбинированного уплотнения пластиковых отходов // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 4 (46).

Original article

Research on axial and combined sealing of plastic waste

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

¹Moscow 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

¹nikita999-082@mail.ru

²proektdm@mail.ru

³r.danilov@nami.ru

Abstract. The collection and transportation of municipal solid waste are critical initial stages of the entire waste management system. Environmental safety, economic costs, and the possibility of subsequent recycling depend on their effective organization. Separate waste collection is one of the most important ways to further process waste. Improving the design of garbage trucks designed for separate waste collection, increasing their efficiency, and reducing their cost is an urgent and important task for urban management. This article discusses methods for compacting plastic waste, including a new method that will be used in the design of garbage trucks in the near future. The combined seal provides a higher plastic waste seal factor and a lower modulus of elasticity compared to the progressive seal.

Keywords: plastic waste, body-mounted garbage truck, compaction factor, plastic deformations, experimental bench, translational compaction, translational-rotational compaction.

For citation: Andriukhov N.M., Kustarev G.V., Danilov R.G. Research on axial and combined sealing of plastic waste. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 4 (46).

Введение

Эффективность управления твердыми коммунальными отходами (ТКО) является одной из ключевых задач современного городского хозяйства [1]. В рамках этой сложной многокомпонентной системы этап сбора и транспортировки отходов на объекты обработки и утилизации сопряжен с наибольшими эксплуатационными затратами. Значительная часть этих затрат обусловлена работой мусоровозного транспорта, чья производительность напрямую определяет экономическую и экологическую составляющую всего процесса.

Для дальнейшей переработки важным и актуальным является отдельный сбор твердых коммунальных отходов. Одними из ключевых составляющих отдельного сбора являются отходы из пластика. Ключевым элементом, влияющим на производительность мусоровоза, является система уплотнения отходов в его кузове. От эффективности системы уплотнения зависит производительность и стоимость транспортирования отходов. В процессе сбора и транспортирования отходов в кузове мусоровоза возникают проблемы уплотнения плохо уплотняемых частиц пластиковых отходов различной формы и назначения. Для повышения эффективности процесса уплотнения была предложена и разработана новая система уплотнения отходов поступательно-вращательного действия, которая благодаря дополнительному усилию за счет вращения позволяет измельчать и равномерно распределять отходы по кузову мусоровоза.

Экспериментальная часть

Современные исследования методов уплотнения отходов [2] демонстрируют, что комбинированное силовое воздействие, сочетающее поступательное и вращательное движение, обеспечивает более существенный рост плотности материала по сравнению с традиционным прессованием только в одном направлении. Экспериментальная проверка данного положения была выполнена на специально разработанном лабораторном оборудовании, в рабочую камеру которого помещались фракции пластика.

В ходе испытаний анализировалась взаимосвязь между напряжением σ (кПа), формирующимся в массиве отходов, и коэффициентом уплотнения $K_{упл}$. Напряжение создавалось двумя способами: простым сжатием и комбинированным сжатием со сдвигом. Ключевой практической задачей серии экспериментов являлось определение расчетного модуля деформации для твердых коммунальных отходов (ТКО).

В качестве модельного материала использовалась бытовая пластиковая тара, имеющая разнообразную геометрию и вместимость. Перед загрузкой

с емкостей снимались крышки для обеспечения свободного удаления воздуха в процессе сжатия.



Рис. 1. Пластиковые отходы в камере прессования

В процессе испытаний исходная масса пластиковых отходов подвергалась прессованию. Результат воздействия уплотняющей плиты, совершающей исключительно поступательное перемещение, представлен на рисунке 2. Для сравнения, на рисунке 3 показан образец, полученный после обработки плитой, совмещающей поступательное и вращательное движение.

Анализ данных, полученных в ходе испытаний поступательного (рис. 2) и поступательно-вращательного (рис. 3) способов прессования, показал значительное (на 22,23%) снижение модуля деформации материала при использовании второго метода [4, 5]. Введение касательной (сдвиговой) составляющей в силовое воздействие обеспечивает более равномерное распределение частиц пластика по доступному пространству камеры. Это создаёт условия для более эффективного использования осевого усилия, позволяя достичь предельно возможного для данных отходов коэффициента уплотнения.



Рис. 2. Прессование пластиковых отходов при осевом сжатии



Рис. 3. Прессование пластиковых отходов при комбинированном сжатии

Механизм уплотнения пластиковой массы при вытеснении воздуха носит двухстадийный характер. На начальном этапе преобладают необратимые пластические деформации. По мере сокращения внутренних полостей материал переходит в режим упругих деформаций. Данный переход проявляется в виде частичного восстановления объема после снятия нагрузки и удаления прессующего диска из камеры.

На рисунке 4 представлена зависимость коэффициента уплотнения исследуемых пластиковых отходов от величины механического напряжения, возникающего в уплотняемой среде.

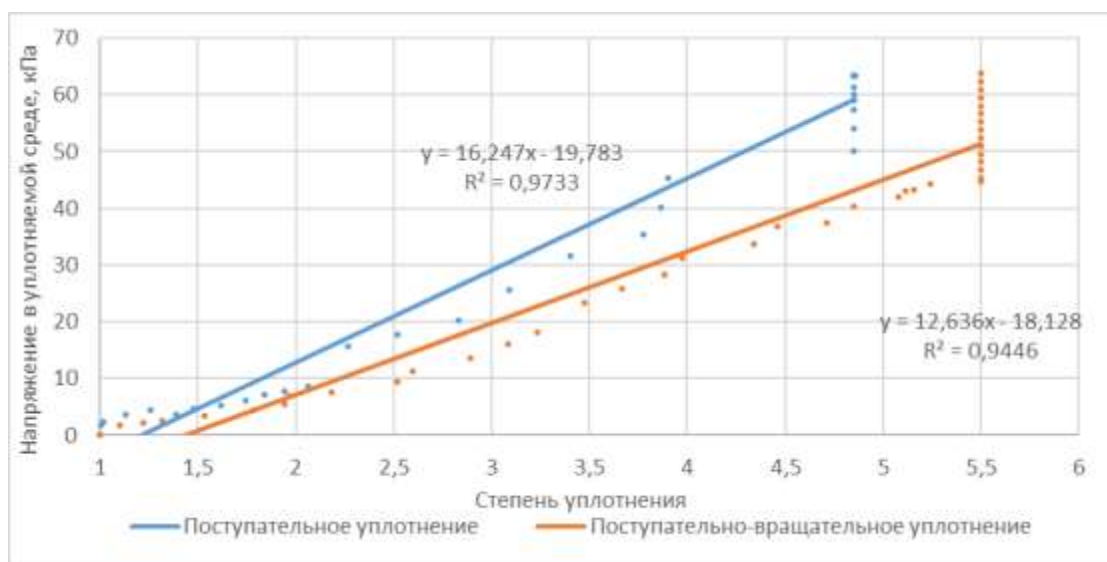


Рис. 4. График зависимости степени уплотнения пластиковых отходов от напряжения в уплотняемой среде

При осевом сжатии отходов получена функция зависимости напряжения от степени уплотнения (1) – (2).

$$\sigma = 16,247 * K_{упл} - 19,783; \quad (1)$$

$$\dot{\sigma}(K_{упл}) = 16,247 = E. \quad (2)$$

При комбинированном сжатии пластиковых отходов получена функция зависимости напряжения от степени уплотнения (3) – (4).

$$\sigma = 12,636 * K_{упл} - 18,128; \quad (3)$$

$$\dot{\sigma}(K_{упл}) = 12,636 = E. \quad (4)$$

Результаты экспериментальных исследований дали возможность определить предельные значения коэффициента уплотнения для двух различных режимов силового воздействия: поступательного и комбинированного (поступательно-вращательного). Кроме того, были рассчитаны и проанализированы модули деформации пластиковой массы, соответствующие каждому из этих способов (рис. 5).

Практическим выводом из проведённой работы является подтверждение эффекта, возникающего при добавлении сдвиговой (касательной) составляющей к основному осевому усилию. Эта модификация процесса приводит к двум ключевым положительным результатам: значительному увеличению конечной плотности материала и существенному снижению его модуля деформации.

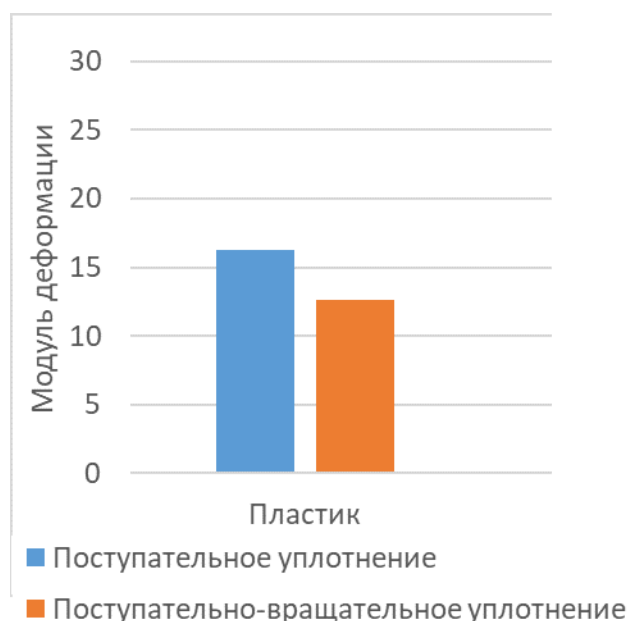


Рис. 5. Диаграмма сравнения модулей деформации при поступательном и поступательно-вращательном уплотнении в ходе экспериментов на стенде для определения параметров уплотнения отходов

Выводы

Уплотнения отходов в кузове мусоровоза является критически важным процессом, позволяющим значительно увеличить полезную нагрузку транспортного средства. Это ведет к существенной экономии на логистике, сокращению рейсов, снижению расхода топлива и т.д. [6–8].

Таким образом, разработанная технология поступательно-вращательного уплотнения является перспективной системой, позволяющей существенно увеличить эффективность процесса сбора и транспортирования ТКО. Дальнейшие исследования будут направлены на изучения и разработку специализированных систем уплотнения отходов, наиболее подходящих для уплотнения отходов из пластика. Данная технология позволит обеспечить селективный сбор отходов и увеличить процент перерабатываемого мусора.

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. Андрюхов, Н. М. Математическая модель процесса взаимодействия толкающей плиты мусоровоза с уплотняемой средой при поступательном и поступательно-вращательном уплотнении / Н. М. Андрюхов, Г. В. Кустарев, Ю. А. Портнов // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 3. – С. 33-37. – EDN LARHLC.

4. Андрюхов, Н. М. Конструкции мусоровозов и систем уплотнения отходов / Н. М. Андрюхов, Г. В. Кустарев, Р. Г. Данилов // Строительные и дорожные машины. – 2023. – № 3. – С. 38-44. – EDN WOLIYY.

5. Кустарев, Г. В. Повышение эффективности вывоза ТКО из городских агломераций / Г. В. Кустарев, Н. М. Андрюхов // IV Международный Косыгинский Форум "Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета". Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума "Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны" : Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны», Москва, 20–22 февраля 2024 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2024. – С. 48-52. – EDN DVVBXF.

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

7. Малев, А. Н. Корректирование норм эксплуатационного пробега шин мусоровоза с учетом особенностей его эксплуатации / А. Н. Малев, Е. М. Генсон // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2017. – Т. 1. – С. 37-40. – EDN ZULLRZ.

8. Худякова, Н. Е. "Экономика" мусоровоза очевидные и неочевидные факторы / Н. Е. Худякова // Твердые бытовые отходы. – 2020. – № 3(165). – С. 60-64. – EDN FZHMXU.

References

1. Balovnev V.I., Kustarev G.V., Danilov R.G., Andryukhov 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. Andryukhov N.M. *Obosnovaniye i razrabotka sistemy postupatel'no-vrashchatel'nogo deystviya dlya povysheniya stepeni uplotneniya tverdyykh 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, 2023, MADI, 154 p.

3. Andryukhov N.M., Kustarev G.V., Portnov Yu.A. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*, 2023, no. 3, pp. 33-37.

4. Andryukhov N.M., Kustarev G.V., Danilov R.G. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny*, 2023, no. 3, pp. 38-44.

5. Kustarev G.V., Andryukhov N.M. *Problemy inzhenernykh nauk: formirovaniye tekhnologicheskogo suvereniteta*, Sbornik trudov, Moscow, Federal'noye gosudarstvennoye byudzhethnoye obrazovatel'noye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya "Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet imeni A.N. Kosygina (Tekhnologii. Dizayn. Iskusstvo)", 2024, pp. 48-52.

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

7. Malev A.N., Genson Ye.M. *Modernizatsiya i nauchnyye issledovaniya v transportnom komplekse*, 2017, vol. 1, pp. 37-40.

8. Khudyakova N.Ye. *Tverdyye bytovyye otkhody*, 2020, no. 3(165), pp. 60-64.

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.

Роман Геннадиевич Данилов, канд. техн. наук, начальник отдела, ФГУП «НАМИ».

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.

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 16.12.2025; принята к публикации 25.12.2025.

The article was submitted 27.11.2025; approved after reviewing 16.12.2025; accepted for publication 25.12.2025.