

Научная статья
УДК 629.331
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>
EDN: ERRFAQ



РЕКУПЕРАЦИЯ ТОРМОЗНОЙ ЭНЕРГИИ, ЕЁ ВИДЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ АВТОМОБИЛЯХ

Е.А. Павленко ✉, Н.А. Жданов, В.Л. Крячек-Ахиев
Пятигорский институт (филиал) СКФУ,
г. Пятигорск, Россия
✉ ответственный автор
evgeneip@bk.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Важнейшей частью автомобиля является тормозная система. От исправной работы тормозной системы зависит безопасность дорожного движения и самое главное – жизнь людей. Разработка системы рекуперации тормозной энергии позволяет снизить износ тормозных накладок и тем самым улучшить экологичность транспортного средства.

Материалы и методы. В данной работе рассмотрены существующие виды рекуперативного торможения. Система KERS (Kinetic Energy Recovery System) и её виды, рекуперация тормозной энергии с помощью кинетического маховика и рекуперация с помощью мотор-генератора. Также рассмотрена не менее перспективная гидравлическая рекуперация или система Hybrid Air, проведены расчёты рекуперативной мощности кинетического маховика применительно к отечественным автомобилям.

Результаты. Предполагается, что для внедрения системы рекуперации в отечественные автомобили выгоднее использовать механическую рекуперацию, так как она дешевле других видов, проще в установке и производстве. Если рекуперировать тормозную энергию с помощью кинетического маховика, то на колёса автомобиля можно будет вернуть около 7 лошадиных сил. Оставшаяся энергия тратится на раскручивание маховика и потери в механизмах системы, связанные с передачей от маховика к колёсам. Энергия, которая раньше тратилась на нагрев тормозных дисков и тормозных колодок, теперь тратится на раскручивание маховика, тем самым снижая температуру механизмов тормозной системы.

Обсуждение и заключение. В ходе проведённого анализа конструкторских и технологических решений, а также выполненных расчётов, можно сделать вывод, что использование на исследуемом автомобиле ЛАДА КАЛИНА-2 кинетической рекуперативной системы позволит в городском цикле эксплуатации автомобиля получить дополнительно 7 лошадиных сил на протяжении 6 сек работы системы рекуперации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозная система, рекуперативное торможение, кинетический маховик, тормозная энергия, электрическая рекуперация, гидравлическая рекуперация

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 22.08.2025.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Павленко Е.А., Жданов Н.А., Крячек-Ахиев В.Л. Рекуперация тормозной энергии, её виды и возможность применения на отечественных автомобилях // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 4. С. 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>

© Павленко Е.А., Жданов Н.А., Крячек-Ахиев В.Л., 2025



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>
EDN: ERRFAQ

BRAKE ENERGY RECOVERY, ITS TYPES AND THE POSSIBILITY OF APPLICATION ON DOMESTIC CARS

Evgeny A.I. Pavlenko ✉, **Nikolay A. Zhdanov**, **Valentin L. Kryachek-Akhiev**
Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk,
Pyatigorsk, Russia
✉ corresponding author
evgeneip@bk.ru

ABSTRACT

Introduction. The most important part of a car is the brake system. Road traffic safety and, most importantly, people's lives depend on the proper operation of the brake system. The development of brake energy recovery system allows increasing the service life of the brake system and increasing its resistance to overheating.

Materials and methods. This paper examines regenerative braking types. The KERS (Kinetic Energy Recovery System) system and its types, recuperation of braking energy via a kinetic flywheel and a motor generator have been considered. The paper examines hydraulic recuperation or Hybrid Air system, and calculates the regenerative power of a kinetic flywheel as applied to domestic cars.

Results. It is assumed that for the implementation of the recovery system in domestic cars, it is more profitable to use mechanical recovery, since it is cheaper than other types, easier to install and manufacture. Recovering braking energy via a kinetic flywheel leads to about 7 horsepower delivered to the car wheels. The remaining energy is spent on spinning the flywheel and losses in the system mechanisms associated with transmission from the flywheel to the wheels. The energy that was previously spent on heating the brake discs and brake pads is now spent on spinning the flywheel, thereby reducing the temperature of the braking system mechanisms.

Discussion and conclusions. In the course of the analysis of design and technological solutions, as well as the calculations performed, it can be concluded that the use of a kinetic recuperative system on the LADA KALINA-2 vehicle under study will allow an additional 7 horsepower to be obtained in the city cycle of vehicle operation during 6 seconds of operation of the recuperative system.

KEYWORDS: brake system, regenerative braking, kinetic flywheel, braking energy, electrical recuperation, hydraulic recuperation

The article was submitted: 01.04.2025; approved after reviewing: 25.06.2025; accepted for publication: August 22, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Pavlenko E.A.I., Zhdanov N.A., Kryachek-Akhiev V.L. Brake energy recovery, its types and the possibility of application on domestic cars. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (4): 606-617. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-4-606-617>

© Pavlenko E.A.I., Zhdanov N.A., Kryachek-Akhiev V.L., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Тормозная система является очень важной частью любого автомобиля. Европейский экологический стандарт «Евро-7» планируется ввести в 2026 г., он заменит предыдущую версию стандарта «Евро-6». Новая версия нормативов направлена на значительное сокращение загрязнений окружающей среды от автомобильного транспорта, особенно в городах Европы, где наблюдается высокая концентрация транспортных средств. Экологические нормы в первую очередь направлены на сокращение выбросов CO₂. Стандарт определяет ограничение выбросов для легковых автомобилей примерно на уровне 80 г/км, что делает обязательным переход автопроизводителей на электромобили и гибридные транспортные средства. Особое внимание также уделяется контролю твёрдых частиц размером менее 2,5 мкм (PM_{2,5}). Такие мелкие частицы способны проникать глубоко в дыхательные пути и вызывать серьёзные заболевания лёгких и сердечно-сосудистой системы. Экологический стандарт также вносит запрет на использование определённых химических элементов и металлов, применяемых ранее в различных компонентах авто (таких как медь, кадмий, свинец, никель и т.п.), призван сократить риск попадания этих веществ в атмосферу и почву. Автопроизводители обязаны применять экологически чистые материалы и соблюдать новый регламент относительно запрещённых веществ, внедрять технологии, позволяющие существенно снизить выбросы твёрдых частиц и микроскопической пыли. В отличие от предыдущих версий экологических стандартов, «Евро-7» охватывает весь жизненный цикл транспортного средства, начиная от процесса изготовления и заканчивая утилизацией отходов и деталей. Ожидается внедрение современных методов переработки и вторичного использования запчастей, снижающих общий углеродный след автомобилестроительной отрасли. Эти требования распространяются

также на тормозные системы автомобилей, поскольку износ тормозных колодок является источником загрязнения воздуха мелкими частицами пыли и токсичными веществами. Нормы «Евро-7» устанавливают строгие ограничения на содержание тяжёлых металлов и абразивных материалов в составе фрикционных элементов тормозных колодок, что способствует уменьшению воздействия транспорта на окружающую среду и здоровье населения. Введение этих норм требует разработки новых технологий производства и совершенствования конструкции тормозных механизмов, обеспечивая безопасность дорожного движения при одновременном снижении экологической нагрузки и увеличении автопарка [1].

Организация объединённых наций (ООН) и многие правительства стран обеспокоены ситуацией с загрязнением окружающей среды выбросами от шин, тормозных механизмов и дорожных покрытий. Поэтому стирание шин и тормозных механизмов представляет серьёзную экологическую проблему, усложняющуюся популярностью больших и мощных транспортных средств, таких как внедорожники, спорткары и стремительно увеличивающееся количество электромобилей, которые тяжелее по сравнению со стандартными автомобилями из-за наличия аккумуляторов.

Одним из способов снижения износа тормозных накладок является рекуперативное использование энергии, расходуемой на трение в системе «тормозная накладка – тормозной диск (или барабан)». В данной статье рассматриваются известные способы такой рекуперации и дана оценка возможности их применения на одном из отечественных автомобилей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рекуперация – это обратное получение, возвращение материалов или энергии для дальнейшего (вторичного) использования в том же технологическом процессе^{1,2,3} [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

¹ Тарраф М., Гаевский В.В., Диб М. Моделирование автомобиля с комбинированной системой хранения энергии на основе аккумулятора и маховика // Современные исследования: теория, практика, результаты (ШИФР-МКСИ) Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции. Москва. Центр развития образования и науки 2024 г. С. 46-56.

² Жданов С.В., Веретин Я.С., Филимонов В.С. Ёмкостные накопители электрической энергии, применяемые на автомобилях // Проблемы и перспективы развития тылового обеспечения войск национальной гвардии. Сборник научных статей XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Пермь. Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации. 2024. С. 131-136.

³ Кочетков С.А. Рекуперация энергии в электротранспортном средстве // Математическая теория управления и её приложения: МКПУ-2022 Материалы 15-ой мультikonференции по проблемам управления. Санкт-Петербург, «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор». 2022. С. 128-131.

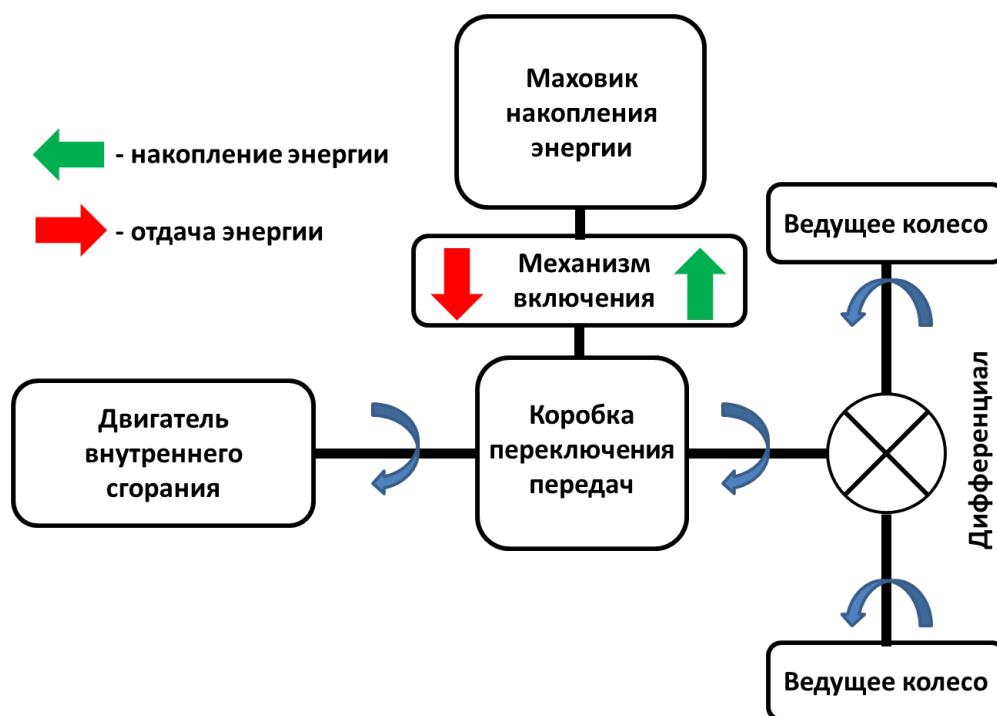


Рисунок 1 – Kinetic Energy Recovery System
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Kinetic Energy Recovery System
Source: compiled by the authors.

В данной статье рассматривается рекуперация кинетической энергии при торможении автомобиля. На данный момент существует три вида рекуперации тормозной энергии автомобиля:

1. Механическая рекуперация тормозной энергии – восстановление кинетической энергии транспортного средства во время торможения путём её накопления в виде механической энергии и последующего повторного использования для ускорения автомобиля.

2. Электрическая рекуперация тормозной энергии – восстановление с помощью мотор-генератора, основанное на преобразовании кинетической энергии движущегося транспортного средства в электрическую энергию при торможении.

3. Гидравлическая рекуперация тормозной энергии – восстановление с помощью гибридной силовой установки, объединяющей традиционный двигатель внутреннего сгорания (ДВС), пневматический накопитель и гидравлический насос-компрессор.

Механический вид рекуперации энергии в настоящее время нашёл применение в спортивных автомобилях Formula 1 (рисунок 1). Система KERS имеет три основных цикла: накопление энергии вращения колёс при торможении; сохранение кинетической энергии вращения колёс; применение накопленной энергии. Во время использования накопленной энергии автомобиль получает дополнительно 70–80 лошадиных сил на несколько секунд работы. Использование системы KERS в городском цикле позволяет сэкономить около 20% топлива⁴. Механическая система KERS основывается на раскрутке маховика массой 5 кг до частоты вращения более 60 000 оборотов в минуту.

Энергия, передаваемая маховику от вращения колёс при торможении, передаётся через тороидальный вариатор и уходит на раскручивание маховика, находящегося в цилиндрической герметичной камере. Тороидальный вариатор обеспечивает передачу энергии с минимальными потерями к накопи-

⁴ Тарраф М., Гаевский В.В., Диб М. Обзор результатов в применении гибридных транспортных систем с маховиком // Омский научный вестник. Серия: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2024. Т. 8, № 4. С. 63–72.

телю (маховику) и от накопителя обратно к колёсам (рисунок 2). Такой вариатор позволяет развить мощность 80 лошадиных сил в течение 6 сек⁵. Вся система имеет вес порядка 24 кг и занимает объём 13 дм³.

Со временем Formula 1 перешла с механического вида рекуперативного торможения к электрическому виду.

Электрическое рекуперативное торможение на сегодняшний день распространено и применяется на гибридных автомобилях. Такой вид рекуперации позволяет транспортным средствам за счёт подзарядки аккумулятора во время торможения проехать большее расстояние^{6,7} [10, 11, 12, 13, 14, 15]. Переход на электрическую рекуперацию обусловлен низкой продолжительностью сохранения кинетической энергии маховиком.

Электрическая KERS функционирует следующим образом.

Мотор-генератор, установленный на коленчатом валу двигателя, при торможении переходит в режим генератора, накапливая энергию в аккумуляторные батареи. При необходимости увеличения мощности автомобиля водитель нажимает кнопку на руле, и накопленная энергия из аккумуляторных батарей направляется в мотор-генератор, который переходит в режим работы электродвигателя (см. рисунок 2).

Такая система имеет следующие плюсы:

- энергия, накапливаемая в аккумуляторных батареях, хранится гораздо дольше, чем кинетическая энергия маховика;
- в режиме торможения совместно с работой мотор-генератора на трансмиссию действует сила, дополнительно замедляющая транспортное средство.

Однако данная система имеет и минус:

- чрезмерный нагрев аккумуляторных батарей, требующих охлаждения. Для устранения этой проблемы на Formula 1 стали устанавливать суперконденсаторы. Это связано с тем, что из-за химических процессов, протекающих в аккумуляторных батареях, при кратковременном торможении незначительное количество энергии не получалось аккумулировать. Суперконденсатор накапливал эти кратковременные, но сильные всплески электроэнергии и отдавал энергию аккумуляторным батареям равномерно. Из-за высокой стоимости суперконденсаторы не получили широкого распространения в серийных автомобилях.

На данный момент наибольшую перспективу имеет пневмогидравлическая рекуперация. Наиболее известна установка Hybrid Air (рисунок 3)^{8,9}.

⁵ Тарраф М., Гаевский В.В., Диб М. Обзор результатов в применении гибридных транспортных систем с маховиком ... С. 63–72.

⁶ Хохлов А.А., Колдин М.С. Автомобили с гибридным приводом: особенности конструкции, направление модернизации // Наука и образование: материалы Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» Мичуринский государственный аграрный университет. 2024. Т. 7, № 4.

⁷ Хохлов А.А., Колдин М.С. Автомобили с гибридным приводом: особенности конструкции, направление модернизации // Наука и образование. Материалы Международной научно-практической конференции «Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК» Мичуринский государственный аграрный университет. 2024. Том 7. № 4.

⁸ Кочергин В.И., Косолапов Д.А. Применение пневматических трансмиссий на автомобильной технике // Современные аспекты развития и безаварийной эксплуатации автомобильной техники (бронетанкового вооружения и техники): сборник материалов конференции III Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященная 105-летию со дня рождения Ивана Кирилловича Яковлева, Новосибирск, 31 мая 2023 года. Новосибирск: Новосибирский военный институт имени генерала армии И.К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023. С. 64–68.

⁹ Кочергин В.И., Косолапов Д.А. Применение пневматических трансмиссий на автомобильной технике // Современные аспекты развития и безаварийной эксплуатации автомобильной техники (бронетанкового вооружения и техники): сборник материалов конференции III Межвузовской научно-технической конференции с международным участием, посвященная 105-летию со дня рождения Ивана Кирилловича Яковлева, Новосибирск, 31 мая 2023 года. Новосибирск: Новосибирский военный институт имени генерала армии И.К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2023. С. 64–68.

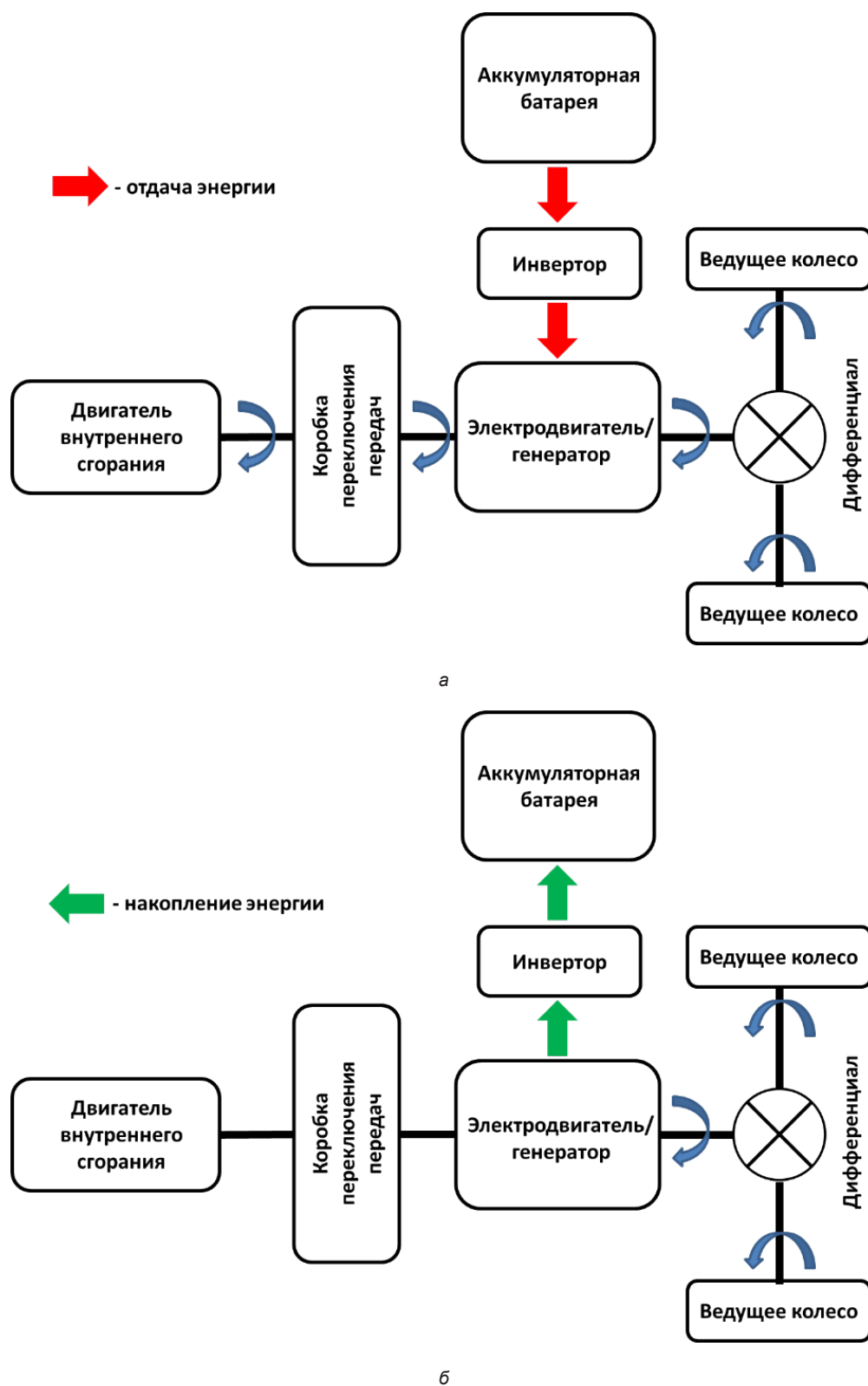


Рисунок 2 – Схема работы системы рекуперации: а – режим ускорения; б – режим торможения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Recovery system operation scheme: a - acceleration mode; b - braking mode
Source: compiled by the authors.

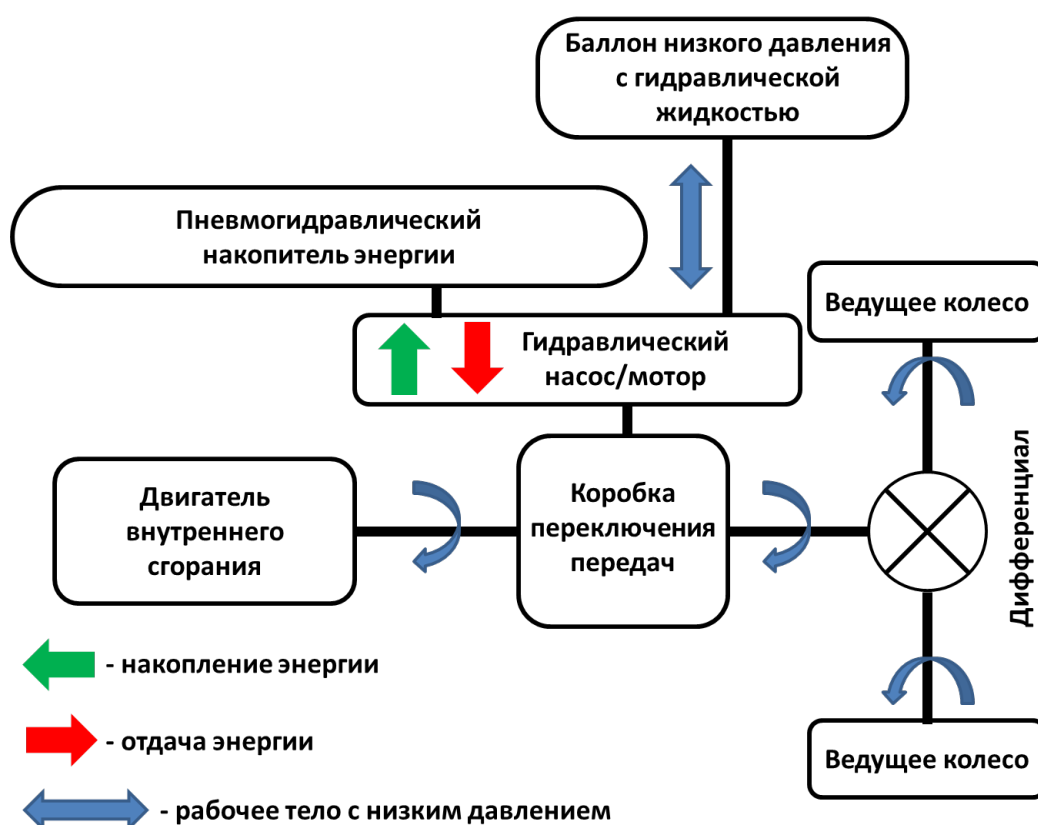


Рисунок 3 – Строение гибридного автомобиля PEUGEOT 2008 HybridAir
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Structure of the PEUGEOT 2008 Hybrid Air hybrid vehicle
Source: compiled by the authors.

Однако количество имеющихся таких транспортных средств невелико. Суть работы подобного агрегата заключается в способности гидромотора накачивать рабочую жидкость в большой гидроаккумулятор – трубу со сжатым газом. При разгоне автомобиля сжатый газ выталкивает рабочую жидкость, которая вращает тот же гидродвигатель и помогает экономить топливо. В системе нет дорогих аккумуляторных батарей, и её ресурс очень велик. Мощность гидромоторов также велика, а стоимость установки значительно меньше рассмотренных выше систем.

Подобная конструкция имеет и значительный минус – пневмогидравлический рекуператор обладает большими габаритами и массой, и реально его энергии хватает на один-два цикла разгона и торможения. Пробег без вклю-

чения ДВС составляет только пару километров для легковой машины и сотни метров для грузовика. При использовании на автобусах аналогичная конструкция позволяет полностью отказаться от применения классических тормозных механизмов, гидродвигатель сможет замедлить автомобиль до полной остановки.

Пневмогидравлический рекуператор по своим характеристикам превосходит электрические системы, которые при низкой скорости вращения колёс становятся уже неэффективными. Большим плюсом является возможность запасти энергию надолго, на часы или даже дни, в отличие от маховиков, которые уже после нескольких минут утрачивают крупную часть запасённой энергии. К сожалению, масштабные планы фирмы PEUGEOT были безразлично восприняты новыми акционе-

рами из китайской DONGFENG, а также партнёрами по разработке системы из FORD. Но именно китайские грузовики DONGFENG могут оказаться следующими массовыми носителями этой технологии.

На данный момент среди всех видов рекуперативного торможения автомобильные концерны создают экспериментальные автомобили, использующие именно механическую рекуперацию торможения для серийного производства. Поэтому можно задаться вопросом о возможности использования рекуперативного торможения на отечественных автомобилях.

Для этого необходимо узнать энергию торможения исследуемого автомобиля. Гипотетически для внедрения рекуперации торможения выберем отечественный бюджетный автомобиль ЛАДА КАЛИНА-2 и выполним необходимые расчёты. Требуется рассчитать энергию, получаемую маховиком при торможении, а также энергию, получаемую колёсами от маховика в момент ускорения¹⁰ [16, 17, 18, 19].

Расчёты производим, опираясь на конструкцию KERS. Нами была выбрана механическая система с маховиком из-за её относительно низкой стоимости в массовом производстве.

Для того чтобы рассчитать энергию торможения, нужно знать условия, при которых эта энергия будет накапливаться. Исследуемый автомобиль тормозит с максимально разрешённой скоростью в городе (60 км/ч) до полной остановки перед светофором. Зная это, можно рассчитать энергию, затрачиваемую на торможение, и энергию, получаемую от рекуперации.

$$E = \frac{mV^2}{2},$$

где E – кинетическая энергия автомобиля;

m – масса исследуемого автомобиля – 1185 кг;

V – скорость, с которой начинается торможение – 60 км/ч = 16,6 м/с.

$$E = 165 \text{ кДж.}$$

При торможении автомобиля ЛАДА КАЛИНА-2 со скорости 60 км/ч до полной остановки

по результатам расчётов получаем величину 165 кДж.

Маховик для рекуперации энергии принято расположить на задней оси исследуемого автомобиля. Передача энергии торможения от колёс к маховику будет осуществлена через вариатор. КПД вариатора составляет от 60 до 85%, передаточным отношением вариатора будет регулироваться степень торможения автомобиля. Регулировка усилия торможения вариатора будет осуществляться при помощи датчика положения педали тормоза либо отдельным тумблером.

Такая конструкция позволит передать кинетическую энергию от вращения колёс при торможении на маховик:

$$E = 0,5 \times I \times \omega^2,$$

где E – энергия торможения;

I – момент инерции массы;

ω – угловая скорость маховика.

$$I = 0,5 \times m \times r^2,$$

где m – масса маховика;

r – радиус маховика.

За основу нами выбрана KERS, следовательно, параметры маховика возьмём такие же, как применяются в KERS:

$M = 5 \text{ кг};$

$r = 120 \text{ мм.}$

Отсюда

$$\omega = 2 \times \pi \times N,$$

где N – частота вращения маховика;

$\pi = 3,14.$

Отсюда получаем $N = 124,2$ оборотов в секунду или $N = 7452$ оборотов в минуту.

Потери при стоянке на светофоре составят примерно 10%, остальная энергия от вращения маховика вернётся обратно на колёса через вариатор. При условии, что маховик будет работать по аналогии с маховиком Formula 1, получается 80 лошадиных сил при 80 000 оборотах в минуту. В нашем случае, как упоминалось выше, в течение 6 сек работы маховика на колеса будет передаваться усилие около 7 лошадиных сил.

¹⁰ Андреева Д.А. Повышение экономичности наземно-транспортных технологических машин с помощью рекуперации энергии торможения // Магистратура – автотранспортной отрасли. Материалы VII Всероссийской межвузовской конференции. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург. 2023. С.102-106.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проделанной работы можно сделать вывод, что исследуемый автомобиль ЛАДА КАЛИНА-2 массой 1185 кг тратит энергию в 163,3 кДж при торможении со скорости 60 км/ч до полной остановки. Эта энергия, если её не рекуперировать, переходит в тепловую энергию, нагревая тормозные колодки и тормозной диск. Рекуперировать её можно тремя способами:

- с помощью накопления кинетической энергии маховиком;
- с помощью преобразования энергии вращения колёс при торможении в электрическую энергию, используя для этого мотор-генератор;
- с помощью пневмогидравлической рекуперации.

Предполагается, что для внедрения системы рекуперации в отечественные автомобили выгоднее использовать механическую рекуперацию, так как она дешевле других видов, проще в установке и производстве. Если рекуперировать тормозную энергию с помощью кинетического маховика, то на колёса автомобиля можно будет вернуть около 7 лошадиных сил. Оставшаяся энергия тратится на раскручивание маховика и потери в механизмах системы, связанные с передачей от маховика к колёсам. Энергия, которая раньше тратилась на нагрев тормозных дисков и тормозных колодок, теперь тратится на раскручивание маховика, тем самым снижая температуру механизмов тормозной системы. Следовательно, положительным моментом также является тот факт, что снижение рабочей температуры тормозных дисков и тормозных колодок повышает эффективность тормозной системы. Также снижается выброс твёрдых частиц в окружающую среду от продуктов износа фрикционных поверхностей деталей тормозной системой.

Проведя анализ технических характеристик популярных моделей, выпускаемых на сегодняшний день автомобилей, можно сделать вывод, что среднее время разгона современного транспортного средства с 0 до 100 км/ч составляет около 12 сек. Энергия, накопленная в маховике в количестве 7 лошадиных сил, способна вращать маховик в течение 6 сек. Если уменьшить время работы маховика, то возможно увеличить мощность, передаваемую на колёса, но для городских условий востребован плавный разгон до максимально разрешённой скорости. В связи с этим для более эффектив-

ного использования автомобиля в городской среде было принято использование маховика в течение 6 сек, что делает эксплуатацию транспортного средства более эффективной.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведённого анализа конструкторских и технологических решений, а также выполненных расчётов, можно сделать вывод, что использование на исследуемом автомобиле ЛАДА КАЛИНА-2 кинетической рекуперативной системы позволит в городском цикле эксплуатации автомобиля получить дополнительно 7 лошадиных сил на протяжении 6 сек работы системы рекуперации.

Такое решение даст следующие эксплуатационные преимущества:

- увеличение мощности при ускорении;
- снижение расхода топлива;
- уменьшение нагрузки на тормозную систему;
- увеличение срока службы тормозной системы;
- уменьшение загрязнения окружающей среды продуктами износа фрикционных поверхностей деталей тормозной системой.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трофименко Ю.В., Комков В.И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 г. // Вестник СибАДИ. 2023; 20(3): 350–361. DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>. EDN: DDEUBI
2. Кузнецов Г.Ю., Логинова Е.Ю., Куделин К.В. Применение накопителей энергии на автономном подвижном составе для реализации электродинамического рекуперативного торможения // Электроника и электрооборудование транспорта. Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод». 2023. № 4–6. С. 31–34.
3. Полуэктов А.А., Самурганов Е.Е., Сарксян М.Д. К вопросу изучения современного рекуперативного привода ТС // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2025. № 205. С. 396–404.
4. Худайбердиев А.И., Пулатов Т.Р. Оценка значения гидравлической системы рекуперации при торможении автобусов UZUZI // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2021. № 11(92). С. 36–38.
5. Emilia M. Szumska Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges // Energies. 2025. № 18(10). P 1–22.

6. Le V.N., Dam H.Ph., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kusyak V.A. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles // *Energetika. Proceedings of cis higher education institutions and power engineering associations*. 2023. Том 66. № 2. P. 105–123.
7. Исаков В.С., Ерейский А.В., Дериглазов В.С., Ткаченко А.Н. Энергонакопительная тормозная система для мобильных транспортных средств, оборудованных электроприводом // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. № 22. С.61–67.
8. Павлов В.Д. Электромеханическое устройство для аккумулирования энергии // *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2024. Том 18, № 1. С. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>
9. Прилепский Ю.В., Целуйко Л.В., Гуртовенко А.И., Стародубцева Е.И. Исследование системы рекуперации с накопителями конденсаторного типа // *Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. Донецкая академия автомобильного транспорта*. 2024. № 1. С. 30–39.
10. Ehsani M. Singh K.V. Bansal H.O. Mehrjardi R.T. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles // *Proceedings of the IEEE*. 2021. № 109. P. 967–984.
11. Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Золотарев О.О. Исследование энергетической эффективности рабочего процесса гибридной силовой установки автомобиля при установившемся движении // *Труды НГТУ им. П.Е. АЛЕКСЕЕВА*. 2024. № 2 (145). С. 90–101. EDN: BNXVMC
12. Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Степакин В.Р. Энергетическая эффективность режимов разгона автомобиля с гибридной силовой установкой // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки*. 2024. № 3. С. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14018692>
13. Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023. Т. 24, № 1. С. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>
14. Маркина А.А., Почуев Л.А. Проработка концепции автомобиля с гибридной силовой установкой // *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2022. № 3 (55). С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-33-42>
15. Нечипорук Н.В., Воробьев Ю.А., Пода В.Б. Определение показателей пневмодвигателя для гибридной силовой установки городского легкового автомобиля // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2019. № 85. С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.83>
16. Armenta-Déu C., Cortés H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles // *Vehicles*. 2023. № 5(2) P. 387–403.
17. Бутарович Д.О., Скотников Г.И., Эраносян А.В. Алгоритм управления рекуперативным торможением с помощью педали акселератора // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2022. № 4. С. 275–281. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281>
18. Ле Т.Н., Ле Н.Т.М., Дам Х.Ф., Нгуен Т.Т., Харитончик С.В., Кусяк В.А. Обзор расчёта энергии рекуперативного торможения электрических автомобилей // *Автотракторостроение и автомобильный транспорт. Белорусский национальный технический университет*. 2023. Т. 1. С. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>
19. Лин З.Н., Скрынников А.В., Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Математическая модель рекуперации электрической энергии транспортного средства // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2023. Т. 24, № 2. С. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

REFERENCES

1. Trofimenko I.V., Komkov V.I. Updated number forecast, russian car fleet structures by type of power plants and greenhouse gas emissions until 2050. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20(3): 350–361. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>. EDN: DDEUBI
2. Kuznetsov G.Yu., Loginova E.Yu., Kudelin K.V. Use of energy storage devices on autonomous rolling stock for the implementation of electrodynamic regenerative braking. *Electronics and electrical equipment of transport*. 2023; 4-6: 31–34. (In Russ.)
3. Poluektov A.A., Samurganov E.E., Sargsyan M.D. On the issue of studying a modern regenerative drive of a vehicle. *Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University*. 2025; 205: 396–404. (in Russ.)
4. Khudaiberdiev A.I., Pulatov T.R. Assessment of the value of the hydraulic recuperation system during braking of UZUZI buses. *Universum: technical sciences: electronic. scientific journal*. 2021; 11 (92): 36–38. (in Russ.)
5. Emilia M. Szumska Regenerative braking systems in electric vehicles: a comprehensive review of design, control strategies, and efficiency challenges. *Energies*. 2025; 18(10): 1–22.
6. Le V.N., Dam H.Ph., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kusyak V.A. Research of regenerative braking strategy for electric vehicles. *Energetika. Proceedings of cis higher education institutions and power engineering associations*. 2023; Vol. 66. No. 2: 105–123.
7. Isakov V.S., Ereisky A.V., Deriglazov V.S., Tkachenko A.N. Energy-storage braking system for mobile vehicles equipped with an electric drive. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023; 22: 61–67. (in Russ.)

8. Pavlov V.D. Electromechanical device for energy storage. *Izvestiya MGTU "MAMI*. 2024; Vol. 18. No. 1: 13–18. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17816/2074-0530-623775>

9. Prilepskiy Yu.V., Tseluiko L.V., Gurtovenko A.I., Starodubtseva E.I. Study of the recovery system with capacitor-type accumulators. *Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport. Donetsk Academy of Automobile Transport*. 2024; No. 1: 30–39. (in Russ.)

10. Ehsani M. Singh K.V. Bansal H.O. Mehrjardi R.T. State of the art and trends in electric and hybrid electric vehicles. *Proceedings of the IEEE*. 2021; 109: 967–984.

11. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Zolotarev O.O. Study of the energy efficiency of the working process of a hybrid vehicle power plant during steady motion. *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev*. 2024; 2: 90–101. EDN: BNXVMC

12. Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Stepankin V.R. Energy efficiency of hybrid vehicle acceleration modes. *Vestnik of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences*. 2024; 3: 168–177. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14018692>

13. Lin Z.N., Popov A.A., Sidorov V.N., Golubina S.A. Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023; 24(1): 50–56. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

14. Markina A.A., Pochuev L.A. Elaboration of the concept of a car with a hybrid power plant. *Vestnik Ural State Transport University*. 2022; 3 (55): 33–42. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-33-42>

15. Nechiporuk N.V., Vorobyov Yu.A., Poda V.B. Definition of the indicators of the pneumatic motor for the hybrid power plant of an urban passenger car. *Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2019; 85: 83–92. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.85.0.83>

16. Armenta-Déu C., Cortés H. Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles. *Vehicles*. 2023; 5 (2): 387–403.

17. Butarovich D.O., Skotnikov G.I., Erano-syan A.V. Regenerative braking control algorithm using the accelerator pedal. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022; 4: 275–281. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-275-281>

18. Le V.N., Dam H.P., Nguyen T.H., Kharitonchik S.V., Kussyak V.A. Research of Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and pow-*

er engineering associations. 2023; 66(2): 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-105-123>

19. Lin Z.N., Skrynnikov A.V., Chizhevsky K.V., Sidorov V.N. Mathematical model of vehicle electrical energy recovery. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023; 24(2): 177–186. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-2-177-186>

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Павленко Е.А. Поиск источников, проведение обзора литературы. Изучение существующих исследований и систематизация информации. Подготовка текста и рисунков статьи.

Жданов Н.А. Поиск источников, анализ найденных решений и оформление текста статьи.

Крячек-Ахиев В.Л. Поиск источников, выполнение расчётов и оформление текста статьи.

CONTRIBUTION OF AUTHORS

E.A. Pavlenko Literature search and review. State-of-the-art study, systematizing information. Writing the manuscript, preparing figures.

N.A. Zhdanov Literature search, analysis of technical solutions, formatting the text.

V.L. Kryachek-Akhiev Literature search, making calculations and formatting the text.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Павленко Евгений Александрович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Электроэнергетика и транспорт» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорский институт (филиал) СКФУ в г. Пятигорске (357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4068-4213>,

SPIN-код: 3215-1696

e-mail: evgeneir@bk.ru

Жданов Николай Андреевич – преподаватель колледжа ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорский институт (филиал) СКФУ в г. Пятигорске (357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5393-1812>,

e-mail: zhdanovnikolay2000@gmail.com

Крячек-Ахиев Валентин Леонидович – ассистент кафедры «Электроэнергетика и транспорт» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», Пятигорский институт (филиал) СКФУ в г. Пятигорске (357500, г. Пятигорск, пр. 40 лет Октября, д. 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7753-3883>,

e-mail: j182014@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Evgeny A. Pavlenko – PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Transport, North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk (357500, Pyatigorsk, 40th Anniversary of October Ave., 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4068-4213>,

SPIN-code: 3215-1696,

e-mail: evgeneip@bk.ru

Nikolay A. Zhdanov – College Lecturer, North Caucasus Federal University, Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk (357500, Pyatigorsk, 40th Anniversary of October Ave., 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5393-1812>,

e-mail: zhdanovnikolay2000@gmail.com

Valentin L. Kryachek-Akhiev – assistant of the Department of Electric Power Engineering and Transport of the North Caucasus Federal University Pyatigorsk Institute (branch) of NCFU in Pyatigorsk (357500, Pyatigorsk, 40th Anniversary of October Ave., 56).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7753-3883>,

e-mail: j182014@yandex.ru