

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 621.433: 547.211

Статья-перспектива

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-208-220>

Применение шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса

Н.В. Савенков , Е.Л. Головатенко

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка,

Донецкая Народная Республика

✉ e.l.golovatenko@donnasa.ru

EDN: HTLYBN

Аннотация

Введение. Шахтный метан, выделяющийся в процессе подземной добычи угля, с одной стороны рассматривается в качестве причины глобального изменения климата (парниковый газ), а с другой стороны является ценным энергетическим ресурсом. В настоящее время доля его утилизации в мировом масштабе невысока, количество метана, поступающее в атмосферу, ежегодно увеличивается. С целью ограничения выбросов парниковых газов принят ряд законодательных инициатив: Киотский протокол, Парижское соглашение, Федеральный закон № 296–ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов»¹.

В условиях Донбасса задача утилизации шахтного метана является актуальной в связи с плотным размещением источников выбросов и необходимостью повышения безопасности горных работ, а также обеспечивает реализацию принципа комплексного освоения месторождения. Кроме того, боевые действия обусловили повышение стоимости топлива в регионе и увеличение грузооборота автомобильным транспортом ввиду практически не функционирующих ж/д, морского и авиасообщения. Цель исследования — выполнить расчетную оценку энергетической эффективности применения шахтного метана угольных месторождений Донбасса в качестве моторного топлива автомобильных двигателей внутреннего сгорания коммерческого транспорта.

Материалы и методы. В качестве примера для выполнения исследований выбраны распространённые на городских маршрутах г. Макеевки (ДНР) автотранспортные средства БАЗ-2215 на шасси «Газель Бизнес», ГАЗель Next «Citiline» и ПАЗ 3203, оснащённые искровыми и дизельными двигателями марок УМЗ, ЗМЗ и Cummins. Полный состав проб метановоздушной смеси ряда шахт («Шахта им. Чайкино», г. Макеевка, «Шахта Комсомолец Донбасса», г. Кировское), отобранных из дегазационных систем, определён в лабораториях ГУ «МАКНИИ» и ГП «Донецкавтогаз» с помощью газового хроматографа «Кристаллюкс 4000М». Энергетические показатели автомобильных двигателей при работе на различных видах топлива, в том числе на шахтном метане, а также эксплуатационные свойства выбранных автобусов (путевой расход топлива, запасы хода и выбросы диоксида углерода) в условиях городских ездовых циклов по ГОСТ Р 54810–2011² определены в результате выполненной серии расчётов по известным методикам.

Результаты исследования. Выполнена расчётная оценка энергетической эффективности применения шахтного метана в качестве газомоторного топлива. В диапазоне концентраций исследованных образцов газозвуш-ных смесей максимальная расчётная потеря развиваемой эффективной мощности искровых двигателей ЗМЗ и УМЗ составляет до 15 %, а для газодизелей на примере Cummins мощность может быть увеличена до 29 %. Это не препятствует движению выбранных автобусов в условиях ездовых циклов по ГОСТ Р 54810–2011³. В этих условиях путевой расход топлива и запасы хода на одной заправке существенно зависят от компонентного состава шахтного метана и для исследуемых образцов ухудшаются в 1,8–3,5 раза по отношению к показателям на природном газе, используемом для заправки автомобилей, а эмиссия диоксида углерода сокращается на 62–73 % от эмиссии на бензине.

¹ Об ограничении выбросов парниковых газов. Федеральный закон № 296–ФЗ от 02.07.2021. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/607142402> (дата обращения: 21.05.2025).

² ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

³ Там же

Обсуждение. В связи с особенностями дегазационных процессов и горно-геологических условий разных шахт рассматриваемое в статье альтернативное топливо обладает непостоянным компонентным составом. В связи с этим перевод подвижного состава марок ПАЗ и ГАЗ на побочный продукт угледобычи — шахтный метан — сопряжён со следующими сопутствующими сложностями: необходимость применения топливных систем повышенной производительности (в 3 и более раз по отношению к системам питания ДВС сопоставимой мощности, работающим на сжатом газе), ухудшение топливно-экономических и тягово-скоростных свойств автотранспортных средств, а также их запаса хода. В исследовании получена количественная оценка данных изменений. Положительный эффект предлагаемых мероприятий обусловлен снижением негативного воздействия на окружающую среду путём утилизации шахтного метана его применением в качестве газомоторного топлива, уменьшением углеродного следа от автомобильного транспорта, сокращением потребления жидкого углеводородного топлива.

Заключение. В результате исследования установлено, что шахтный метан угольных месторождений Донбасса может быть применён в качестве моторного топлива автомобильных двигателей внутреннего сгорания коммерческого транспорта на примере городских автобусов. Определены соответствующие параметры энергетической эффективности (развиваемая ДВС эффективная мощность, удельные расходы топлива, запасы хода автомобилей в условиях ездовых циклов и т.д.), а также степень их снижения относительно применения традиционных видов топлива. Установлено, что это не препятствует выполнению транспортной работы (в условиях ГОСТ Р 54810–2011⁴) и является оправданным с позиции экономии невозобновляемых ресурсов и повышения экологической безопасности региона.

Ключевые слова: утилизация метана, газомоторное топливо, двигатели внутреннего сгорания, автотранспортные средства

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лабораторий (ГП «Донецкавтогаз», ГУ «МакНИИ» и ГП «Донбасстрансгаз»), на базе которых исследован компонентный состав метановоздушных смесей, угледобывающих предприятий (ГП «Макеевуголь» «Шахта им. Чайкино», ГУП ДНР «Шахта Комсомолец Донбасса»), предоставившим возможность выполнить отбор проб, а также рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и высказанные предложения по их усовершенствованию способствовали повышению качества настоящей работы.

Финансирование. Исследование является составной частью госбюджетной научной темы «Повышение эксплуатационной эффективности автотранспортных средств совершенствованием их технологических, конструкционных и режимных параметров» (Государственное задание № 075-01620-23-00 от 12.05.2023 г.).

Для цитирования. Савенков Н.В., Головатенко Е.Л. Применение шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-208-220>

Perspective Article

The Use of Coal Mine Methane as a Natural Gas Motor Fuel for Commercial Motor Transport in Donbass Cities

Nikita V. Savenkov^{ID}, Ekaterina L. Golovatenko^{ID}✉

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeyevka, Donetsk People's Republic

✉ e.l.golovatenko@donnasa.ru

Abstract

Introduction. Coal mine methane, a greenhouse gas released during underground coal mining, is considered to be a cause of global climate change. However it is also a valuable energy resource. Currently, the global utilization rate of coal mine methane is low, and the amount of methane released into the atmosphere is increasing every year. To limit greenhouse gas emissions, several legislative initiatives have been implemented, including the Kyoto Protocol, the Paris Agreement, and Federal Law No. 296-FZ “On Limiting Greenhouse Gas Emissions”. In the conditions of Donbass, the task of mine methane utilization is relevant due to the dense location of emission sources and the need to improve the safety of mining operations, as well as to ensure the implementation of the principle of integrated field development. In addition, the ongoing hostilities have led to an increase in fuel prices in the region and an increase in road transport due to the limited availability of rail, sea, and air transportation. The aim of the research is to conduct a calculated assessment of the energy efficiency of using mine methane from Donbass coal deposits as motor fuel for commercial vehicles with internal combustion engines.

⁴ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

Materials and Methods. As an example, the studies were conducted on BAZ-2215 vehicles on the GAZelle Business chassis, GAZelle Next Citiline, and PAZ 3203, which were commonly used on urban routes in Makeyevka (DPR). These vehicles were equipped with UMZ, ZMZ, and Cummins spark and diesel engines. The full composition of methane-air mixture samples from several mines (Chaykino Mine, Makeyevka, Komsomolets Donbassa Mine, Kirovskoye), taken from degassing systems, was determined in the laboratories of Makeyevka Research Institute for Mining Safety and Donetskavtobaz using a Kristallyuks 4000M gas chromatograph. The energy efficiency of engines operating on various types of fuel, including mine methane, as well as the performance characteristics of selected buses (fuel consumption, distance-to-empty, and carbon dioxide emissions) under urban driving cycles according to GOST R 54810–2011, were determined through a series of calculations using well-established methods.

Results. An estimation of the energy efficiency of mine methane as a gas engine fuel has been performed. In the range of concentrations of the studied samples of gas-air mixtures, the calculated maximum loss of effective power for ZMZ and UMZ spark engines was up to 15%. For gas-diesel engines, such as Cummins, power could be increased by up to 29%. These findings did not prevent selected buses from operating under driving cycles in accordance with GOST R 54810–2011. Under these conditions, fuel consumption and range per refueling depended significantly on the component composition of mine methane. For the samples studied, it was 1.8–3.5 times worse than for natural gas used for refueling. Emissions of carbon dioxide were reduced by 62–73% compared to gasoline.

Discussion. Due to the specific features of degassing processes and the mining and geological conditions of different mines, the alternative fuel discussed in this article has a variable component composition. In this regard, the transfer of PAZ and GAZ bus rolling stock to a byproduct of coal mining — mine methane — is associated with several challenges. These include the need for more powerful fuel systems (three times or more than the power supply systems of internal combustion engines of comparable power, operating on compressed gas) and deterioration in fuel-economic and traction-speed properties of vehicles, as well as reduced range. A quantitative assessment of these changes has been obtained through research. The positive impact of the proposed measures stems from the reduction in negative environmental impact by using mine methane as a fuel for vehicles, which reduces the carbon footprint of road transport and decreases the consumption of liquid hydrocarbon fuel.

Conclusion. As a result of the study, it has been found that the methane from the Donbass coal mines can be used as motor fuel for commercial vehicles such as city buses. The study has determined the corresponding energy efficiency parameters (the effective power generated by internal combustion engines, the specific fuel consumption, the range of vehicles under driving cycles, etc.), as well as the degree of their reduction compared to traditional fuels. It has been established that this does not affect the performance of transportation work (in compliance with GOST R 54810–2011) and is beneficial from the perspective of saving non-renewable resources and improving environmental safety in the region.

Keywords: methane utilization, gas engine fuels, internal combustion engines, motor vehicles

Acknowledgements. The authors would like to express their gratitude to the staff of the laboratories (SE Donetskavtobaz, SE Makeyevka Research Institute for Mining Safety, and SE Donbasstransgaz), on the basis of which the component composition of methane-air mixtures was studied, coal mining enterprises (SE Makeyevugol Chaykino Mine, SUE DNR Komsomolets Donbassa Mine), for the opportunity to perform sampling, as well as to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their suggestions for improvement the quality of this work.

Financing. This research is an integral part of the scientific research topic “Improving the operational efficiency of motor vehicles by improving their technological, structural and operational parameters” (State Task No. 075-01620-23-00 dated May 12, 2023).

For citation. Savenkov NV, Golovatenko EL. The Use of Coal Mine Methane as a Natural Gas Motor Fuel for Commercial Motor Transport in Donbass Cities. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-3-208-220>

Введение. Шахтный метан является ценным топливно-энергетическим ресурсом, который образуется при добыче угля [1] и при дегазации угольных пластов [2]. Его эффективная утилизация может снизить выбросы парниковых газов [3], повысить экономическую эффективность добычи угля и обеспечить дополнительные источники энергии для автомобильного транспорта [4]. В условиях ограниченных мировых запасов нефти и растущих энергозатрат использование шахтного метана в качестве моторного топлива представляет собой перспективное направление [5], позволяющее снизить зависимость от ископаемого топлива и уменьшить экологическую нагрузку [6]. В рамках Российской Федерации доля метана в выбросах парниковых газов занимает второе место после диоксида углерода и составляет 14 %, практически половина из которых — вклад угольных шахт (400 млн тонн CO₂-эквивалента в год) [7]. Увеличение угледобычи приводит к росту объёмов образования шахтного метана [8], что требует интенсификации дегазации⁵.

⁵ *Global Methane Tracker*. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/b5f6bb13-76ce-48ea-8fdb-3d4f8b58c838/GlobalMethaneTracker_documentation.pdf (дата обращения 27.05.2025).

В ряде стран доля дегазированного метана, используемого в энергетике, достигает 50–80 % [7]; однако в России значительная его часть (более 1 млрд. м³ в год [7]) выбрасывается в атмосферу [9].

В мировой практике утилизация шахтного метана охватывает сжигание, когенерацию [10], химическую переработку и закачку в угольные пласты [11]. Рациональный выбор технологии зависит от компонентного состава газа [12] и характеристик месторождения (рис. 1) [13].

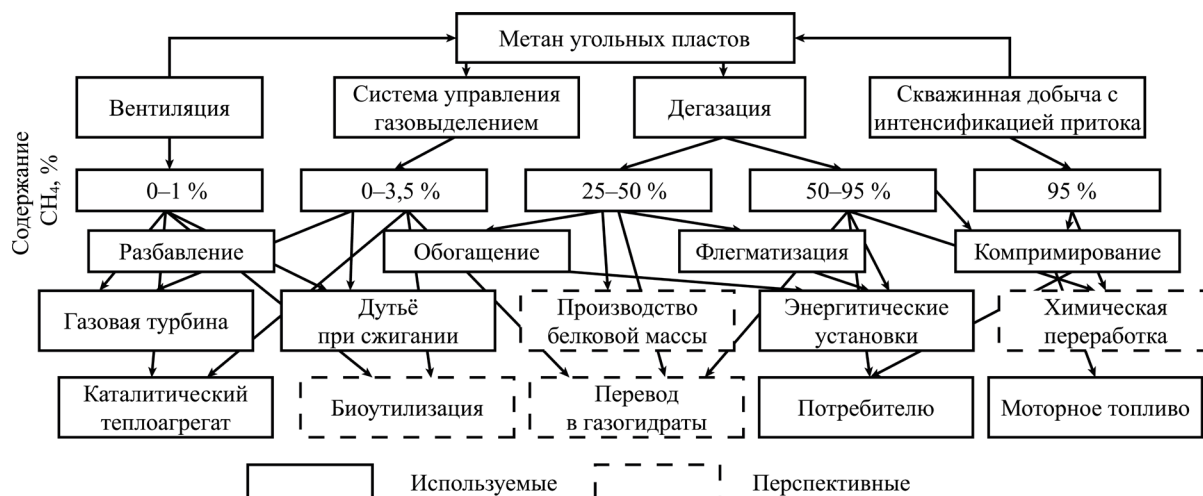


Рис. 1. Основные направления использования шахтного метана [13]

Однако существующие технологии утилизации охватывают ограниченные концентрации метана [14] и при его использовании в качестве моторного топлива требуют дальнейших исследований влияния состава газовой смеси на энергетическую эффективность двигателей и на эксплуатационные свойства автомобилей [5]. Эти факторы создают потребность в системном анализе возможностей применения шахтного метана как альтернативного топлива и в разработке методик оценки его энергетической эффективности для коммерческого транспорта.

Существующие исследования преимущественно фокусируются на стационарных газопоршневых установках [15] и отдельный анализ относится к автомобильным двигателям [16]. Ключевой пробел состоит в нехватке данных о влиянии вариаций состава смеси шахтного метана на энергетические показатели двигателей внутреннего сгорания в условиях реальных циклов движения, а также в отсутствии оценки экономической и экологической эффективности таких решений на масштабе крупных регионов. Таким образом, требуется комплексное теоретическое обоснование использования шахтного метана на транспорте, а также методика расчета энергетической эффективности, учитывающая состав газа, режимы двигателей и циклы движения автомобилей.

Целью работы является выполнение расчетной оценки энергетической эффективности применения шахтного метана угольных месторождений Донбасса в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания коммерческого транспорта. Задачи включают: обзор особенностей дегазации шахтного метана на отечественных и зарубежных месторождениях; анализ его состава на угольных предприятиях Донбасса; моделирование рабочего процесса автомобильных ДВС на различных режимах при использовании в качестве топлива шахтного газа; количественную оценку энергетической эффективности (включая КПД и развиваемые эффективные показатели) для автомобильных силовых установок на шахтном газе в сравнении с традиционными топливами; определение условий и ограничений, обеспечивающих безопасную и экологически выгодную эксплуатацию транспортных средств на шахтном газе; формулирование рекомендаций по технологиям дегазации и подготовки газа для широкого применения в коммерческом транспорте.

Материалы и методы. В работе применены лабораторные методы исследования состава шахтного метана из ГП «Макеевуголь» «Шахта им. Чайкино» (г. Макеевка), ГУП ДНР «Шахта Комсомолец Донбасса» (г. Кировское). Для подготовки лабораторных газов использовался комплексный технологический процесс. Дегазационные системы указанных шахт оборудованы двумя типами вакуум-насосных станций — водокольцевые вакуум-насосы ВН-50 (производство КНР), в которых в качестве рабочего тела применяется вода, отбор проб газа осуществлялся перед вакуум-насосными станциями, для удаления влаги использовался силикагель; ротационные насосы, обладающие средствами обеспыливания и удаления влаги, отбор проб газа осуществлялся на выходе в баллоны емкостью 2 литра. Процессы разубоживания лабораторного газа до требуемой концентрации, а также дополнительного обогащения природным газом не применялись. Определение полного состава отобранного газа осуществлялось в двух лабораториях: газоаналитической лаборатории ГУ «МАКНИИ» (Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности) и химической лаборатории ГП «Донецкавтогаз». Для анализа состава газов использовался газовый хроматограф «Кристаллюкс 4000М».

В качестве примера для выполнения исследований выбраны распространенные на городских маршрутах г. Макеевки (ДНР) автотранспортные средства БАЗ-2215 на шасси «Газель Бизнес», ГАЗель Next «Citiline» и ПАЗ 3203. По данным Муниципального унитарного предприятия администрации г. Макеевки «Диспетчерская служба», на 52-х городских и 28-и пригородных маршрутах города привлечена 231 единица подвижного состава указанных марок, из которых 122 единицы средней вместимости (М3), 109 единиц малой вместимости (М2). Превалирующее количество автобусов оснащено двигателями марок ЗМЗ, УМЗ и Cummins. Основные технические характеристики выбранных автотранспортных средств и их двигателей приведены в таблице 1. Показатели выбранных в качестве примера двигателей при их работе на шахтном метане различного состава, а также на традиционном жидком топливе (развиваемая эффективная мощность, эффективный удельный и часовой расход топлива и т. д.), определены по результатам выполненной серии тепловых расчетов по методике [17].

Эксплуатационные свойства автотранспортных средств (путевой расход топлива, запас хода и выбросы углекислого газа) в условиях ездовых циклов (ЕЦ) по ГОСТ Р 54810–2011⁶ при работе их двигателей на рассматриваемых в исследовании топливах получены путем численного моделирования процесса движения в соответствии с методикой [18].

Таблица 1

Характеристики рассматриваемых автомобилей и их ДВС

Модель автомобиля	ГАЗель Next «Citiline»	БАЗ-2215	ПАЗ 3203
Категория по ТР ТС 018/2011	М ₂	М ₂	М ₃
Класс по ГОСТ Р 54810-2011 ⁷	II	II	II
Пассажировместимость, человек	17	15	48
Полная масса, кг	4 950	3 980	8 500
Энерговооруженность, Вт/кг	17,84	19,72	11,30
Модель двигателя	CUMMINS ISF2.8S4R129	EVOTECH A274	ЗМЗ-5234
Тип	Дизельный, с турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха	Бензиновый, 4-тактный, впрысковый	Бензиновый, 4-тактный, карбюраторный
Количество цилиндров и их расположение	4, рядное	4, рядное	8, V-образное
Диаметр цилиндров и ход поршня, мм	94×100	96,5×92	92×88
Рабочий объем цилиндров, л	2,80	2,69	4,67
Степень сжатия	16,9	10,0	7,6
Номинальная мощность, нетто кВт (л.с.) при частоте вращения коленчатого вала, об/мин	88,3 (120) 3 600	78,5 (106,8) 4 000	96 (130) 3 200–3 400
Максимальный крутящий момент, нетто, Нм (кгсм) при частоте вращения коленчатого вала, об/мин	295 (30,0) 1 600–2 700	220,5 (22,5) 2 350±150	314(32) 2 250–2 500

Для этого в программной среде системы компьютерной алгебры Mathcad в каждой точке ЕЦ решено уравнение мощностного баланса автомобиля [18]. На рис. 2 приведены выбранные ЕЦ, представляющие зависимости скорости движения V от пройденного пути S .

⁶ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

⁷ Там же

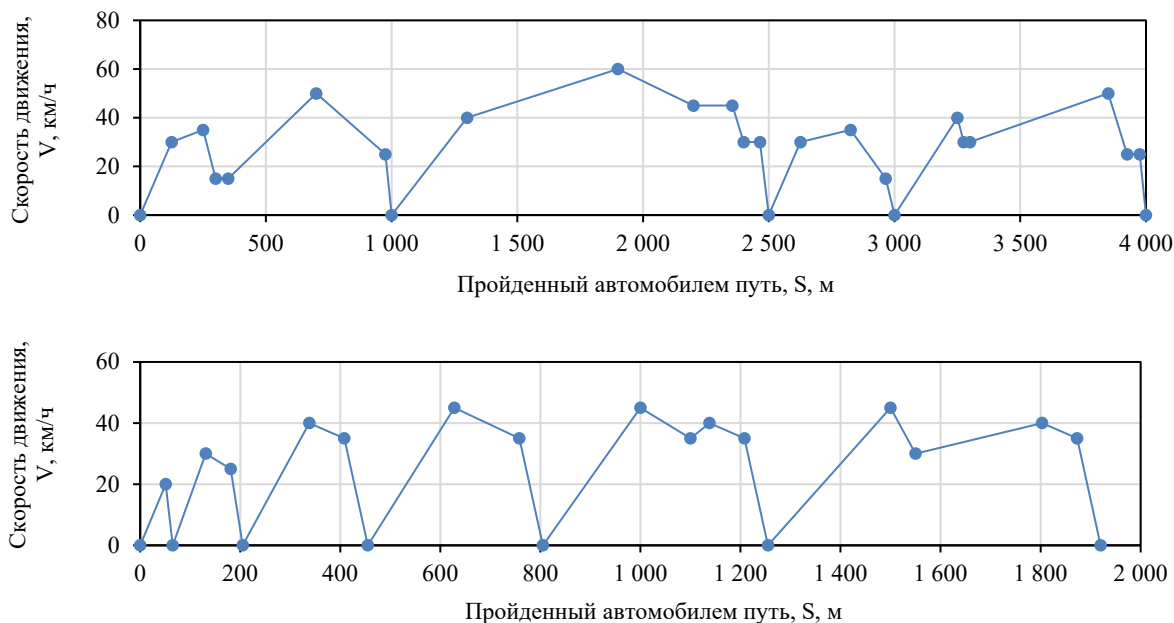


Рис. 2. Выбранные для выполнения исследования ездовые циклы: а — городской цикл на дороге для автомобилей категории М2 класса II; б — городской цикл на дороге для автомобилей категории М3 класса II

Данные варианты циклов характеризуются минимальными ускорениями, что обусловлено невысокими показателями энерговооруженности автомобилей (таблица 1) и ожидаемой потерей максимальной мощности, развиваемой их двигателями при работе на шахтном метане.

Путевой расход топлива определялся следующим образом:

$$m = \frac{1}{S_{\text{ЕЦ}}} \left(\frac{1}{3600} \int_0^{t_{\text{Ц}}} G(t) dt + t_0 \cdot G_{\text{ХХ}} \right), \text{ м}^3/\text{км} \text{ (кг/км)}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ЕЦ}}$ — дистанция ЕЦ (4 км для категории М₂ и 1,92 км для категории М₃); $t_{\text{Ц}}$ — продолжительность ЕЦ (497 с для категории М₂ и 288 с для категории М₃ без учета остановок); $G(t)$ — функция часового расхода топлива от времени движения в цикле, м³/ч (кг/ч); t_0 — суммарная продолжительность остановок, с; $G_{\text{ХХ}}$ — часовой расход топлива двигателя в режиме минимально устойчивой чистоты вращения на холостом ходу, м³/с (кг/с), $G_{\text{ХХ}} = 0,0007$ м³/с для газовых ДВС и $G_{\text{ХХ}} = 0,005$ кг/с для ДВС на жидком топливе [17]).

Запас хода автобуса в условиях ЕЦ вычислялся по формуле (2) для газообразных топлив и по формуле (3) для жидких топлив:

$$S_A = \frac{V_3}{m} = \frac{n_B \cdot V_B}{m} = \frac{m_3}{m \cdot \rho_{\text{ГГ}}} = \frac{m_3}{m} \cdot \frac{R_{\text{Г}} \cdot T_0}{P_0}, \text{ км}, \quad (2)$$

$$S_A = \frac{V_{\text{БТ}} \cdot \rho_{\text{Г}}}{m}, \text{ км}, \quad (3)$$

где V_3 — объем газа при нормальных условиях (НУ), находящийся на борту автомобиля; n_B — количество баллонов на борту автомобиля; V_B — максимальный объем газа при НУ, которым может быть заправлен один баллон; m_3 — заправочная масса газа; $\rho_{\text{ГГ}}$ — плотность газа при НУ; $R_{\text{Г}}$ — газовая постоянная (таблица 2); T_0 и P_0 — температура и атмосферное давление при НУ соответственно; $V_{\text{БТ}}$ — объем топливного бака; $\rho_{\text{ГГ}}$ — плотность жидкого топлива при НУ.

Эмиссия CO₂ в условиях ЕЦ определялась следующим образом:

— для ДВС, работающих на газе (в т.ч. для газодизелей):

$$q = n_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = n_{\text{Г}} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2} = 10^3 \cdot m \cdot \rho_{\text{ГГ}} \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\mu_{\text{Г}}}, \text{ г/км}, \quad (4)$$

где n_{CO_2} — количество вещества (CO₂) в отработавших газах (ОГ), отнесенное к одному километру пути, моль/км; μ_{CO_2} — молекулярная масса CO₂, г/моль; $n_{\text{Г}}$ — количество молей топлива, израсходованного за один километр пути, моль/км; M_{CO_2} — количество CO₂, образующееся при сгорании газообразного топлива, моль/моль, (6); $\mu_{\text{Г}}$ — молекулярная масса газа, г/моль (таблица 2);

— для двигателей, работающих на жидком топливе:

$$q = 10^3 \cdot m \cdot M_{\text{CO}_2} \cdot \mu_{\text{CO}_2}, \text{ г/км}, \quad (5)$$

где M_{CO_2} — количество CO₂, образующееся при сгорании жидкого топлива, кмоль/кг, (7).

Для газодизеля M_{CO_2} определялось по формуле:

$$M_{CO_2} = \sum n(C_n H_m O_r), \quad (6)$$

$$M_{CO_2} = C / 12, \quad (7)$$

$$M_{CO_2} = \sum n(C_n H_m O_r) + g_T \cdot C / 12, \quad (8)$$

где n, m, r — соответственно количество атомов углерода, водорода и кислорода в молекулах газов газовой смеси; $C_n H_m O_r$ — объемная доля газа в газовой смеси, таблица 2; C — массовая доля углерода в топливе (таблица 2); g_T — масса жидкого топлива, приходящаяся на 1 кмоль газового топлива, $g_T = 0,0084$ кг/кмоль.

Результаты исследования. В исследовании получены следующие результаты:

– определен компонентный состав лабораторных газов, отобранных из угольных предприятий Донбасса (таблица 2);

– для моделей автобусов, распространенных на городских маршрутах г. Макеевка, выполнен тепловой расчёт двигателей внутреннего сгорания при их работе на шахтном метане различного компонентного состава (таблицы 3–5);

– для условий городских ЕЦ по ГОСТ Р 54810–2011⁸ выполнено численное моделирование движения автобусов и определены показатели эффективности применения шахтного метана в качестве моторного топлива (таблица 6).

В таблицах 2–6 для образцов лабораторного газа приняты следующие обозначения: газ № 1 — шахта им. Чайкина; газ № 2 — природный газ, используемый для заправки автомобилей (отобран на автомобильной газонаполнительной компрессорной станции); газ № 3 — эталонная газовая смесь по ГОСТ 31371.3–2008; газ № 4 — шахта «Комсомолец Донбасса», первая ВНС; газ № 5 — шахта «Комсомолец Донбасса», вторая ВНС.

Таблица 2

Компонентный состав лабораторных газов (топлив)

Компонентный состав топлива	Объемные доли					Массовые доли	
	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Бензин	Дизель
CO	0	0	0	0	0	–	–
H ₂	0	0	0	0	0,0000417	–	–
CH ₄	0,485	0,959	0,805	0,2745	0,445	–	–
C ₂ H ₆	0,00359	0,02253	0,04	0	0	–	–
C ₃ H ₈	0,00113	0,00694	0,005	0	0	–	–
C ₄ H ₁₀	0,005045	0,00201	0,005	0	0	–	–
C ₅ H ₁₂	0,000058	0,00031	0	0	0	–	–
O ₂	0,0158	0,00008	0	0,1686	0,11683	–	–
CO ₂	0,00137	0,00204	0,09	0,003	0,002583	–	–
N ₂	0,4878	0,00696	0,06	0,5538	0,435417	–	–
C ₆ H ₁₄	0	0,00012	0	0	0	–	–
He	–	–	0	0,0001	0,000075	–	–
C	–	–	–	–	–	0,855	0,860
H	–	–	–	–	–	0,145	0,126
O	–	–	–	–	–	0	0,014
Результаты теплового расчета по методике [17]							
Удельная газовая постоянная, R_g , Дж/(кг·К)	370,5	496	411	327	359	–	
Молекулярная масса, μ , г/моль	22,4	16,76	20,23	25,43	23,16		
Низшая теплота сгорания топлива, газ (бензин/дизель) МДж/м ³ , (МДж/кг)	18,256	18,257	33,5	32,3	9,8	(43,9)	(41,99)
Теоретическое необходимое количество воздуха для сгорания, кмоль/кг, (кг/кг)	4,835	9,842	8,690	1,829	3,717	(14,95)	(14,3)
Теплота сгорания горючей смеси, (бензин/дизель) кДж/м ³ , (кДж/кг)	70086	70087	75011	74722	77598	(83555)	(52911)

⁸ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

С целью оценки изменения эффективных показателей (развиваемой мощности и расхода топлива) выбранных моделей ДВС при их работе на шахтном метане относительно традиционных жидких углеводородных и газомоторных топлив, в соответствии с методикой [17], выполнена соответствующая серия тепловых расчётов. Результаты представлены в таблицах 3–5.

Таблица 3

Результаты теплового расчета двигателя UM3-A27460 EvoTech

Показатель/параметр	Ед. изм.	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Бензин
Коэффициент избытка воздуха	–	1	1	1	1	1	1
Температура остаточных газов	К	918	945	938	956	946	954
Давление в конце сжатия	МПа	1,787	1,787	1,787	1,787	1,787	1,787
Давление в конце сгорания	МПа	6,135	6,342	6,342	6,432	6,360	6,962
Температура в конце сгорания	°С	2197	2303	2278	2342	2303	2505
Среднее индикаторное давление	МПа	0,91	0,96	0,95	0,98	0,96	1,10
Индикаторный КПД	–	0,36	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34
Механический КПД	–	0,811	0,821	0,818	0,824	0,820	0,834
Эффективный КПД	–	0,296	0,294	0,293	0,293	0,294	0,287
Среднее эффективное давление	МПа	0,739	0,791	0,779	0,807	0,788	0,869
Эффективный крутящий момент	Нм	158	169	167	172	169	186
Эффективная мощность двигателя (номинальная)	кВт	66,3	71	70	72,4	70,7	78,5
Часовой расход газа, G , (бензина)	м³/ч (кг/ч)	44,1	23,7	26,5	90,9	54,5	(22,2)

Таблица 4

Результаты теплового расчета двигателя 3МЗ-5234

Показатель/параметр	Ед. изм.	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Бензин
Коэффициент избытка воздуха	–	1	1	1	1	1	1
Температура остаточных газов	К	896,6	923,4	915,6	932,9	923,4	932,3
Давление в конце сжатия	МПа	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420	1,420
Давление в конце сгорания	МПа	4,875	5,039	5,039	5,110	5,054	5,740
Температура в конце сгорания	°С	2183,6	2287,5	2263,2	2325,3	2288,3	2384,1
Среднее индикаторное давление	МПа	0,762	0,807	0,796	0,821	0,806	0,874
Индикаторный КПД	–	0,322	0,317	0,316	0,314	0,316	0,305
Механический КПД	–	0,807	0,818	0,816	0,821	0,817	0,832
Эффективный КПД	–	0,261	0,259	0,258	0,258	0,258	0,253
Среднее эффективное давление	МПа	0,615	0,660	0,649	0,674	0,657	0,727
Эффективный крутящий момент	Нм	229,1	245,7	241,6	250,9	244,6	270,7
Эффективная мощность двигателя (номинальная)	кВт	81,5	87,5	86,1	89,3	87,1	96,1
Часовой расход газа, G , (бензина)	м³/ч (кг/ч)	61,8	33,2	37,2	127,4	76,4	31,2

Таблица 5

Результаты теплового расчета двигателя CUMMINS ISF2.8S4R129

Показатель/параметр	Ед. изм.	Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	Дизель
Коэффициент избытка воздуха по газу (по жидкому топливу)	–	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	(1,6)
Температура остаточных газов	К	850,4	874,1	867,5	879,6	882,8	792,4
Давление в конце сжатия	МПа	6,735	6,735	6,735	6,735	6,735	6,720
Давление в конце сгорания	МПа	12,123	12,123	12,123	12,123	12,123	12,096
Температура в конце сгорания	°С	2239,5	2323,2	2301,1	2342,5	2359,5	1956,7
Среднее индикаторное давление	МПа	1,453	1,531	1,516	1,545	1,587	1,292
Индикаторный КПД	–	0,432	0,423	0,423	0,412	0,414	0,491
Механический КПД	–	0,848	0,856	0,854	0,857	0,861	0,822

Эффективный КПД	–	0,366	0,362	0,362	0,353	0,356	0,404
Среднее эффективное давление	МПа	1,232	1,310	1,295	1,324	1,367	1,062
Эффективный крутящий момент	Нм	272,3	289,4	285,9	292,5	301,8	234,6
Эффективная мощность двигателя	кВт	102,7	109,1	107,8	110,3	113,8	88,4
Часовой расход газа, G , (дизельного топлива)	м ³ /ч (кг/ч)	55,2	29,6	33,2	114,7	72,2	(18,8)

Из данных, приведенных в таблицах 3–4, следует, что для рассматриваемых в исследовании искровых газомоторных двигателей:

– максимальная номинальная мощность развивается при использовании в качестве моторного топлива газа № 4, и составляет соответственно: 72,4 кВт для УМЗ–А27460 EvoTech при часовом расходе топлива на номинальном режиме 90,9 м³/ч и 89,3 кВт для ЗМЗ–5234 при расходе 127,4 м³/ч;

– минимальный расход газа имеет место при использовании газа № 2: 23,7 м³/ч для УМЗ–А27460 EvoTech и 33,2 м³/ч для ЗМЗ–5234; однако при этом номинальная мощность двигателя УМЗ будет снижена до 71 кВт, что почти на 8 кВт меньше, чем его номинальная мощность на бензине (78,5 кВт), а двигателя ЗМЗ до 87,5 кВт при 96 кВт на бензине.

В соответствии с таблицей 5, максимальная эффективная мощность дизельного двигателя с турбонаддувом CUMMINS ISF2.8S4R129, конвертированного в газодизель, составляет 113,8 кВт на номинальном режиме и развивается на образце газа № 5, что превышает на 28,7 % соответствующий показатель на дизельном топливе, часовой расход при этом составляет 72,2 м³/ч.

От величин максимальной эффективной мощности двигателей ключевым образом зависят тягово-скоростные свойства автомобилей.

Выполненные расчёты позволили при помощи зависимостей (1)–(8) определить эксплуатационные свойства автобусов в условиях ЕЦ при работе их двигателей на рассматриваемых топливах. Результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6

Результаты численного моделирования процесса движения автобусов в условиях городских ездовых циклов по ГОСТ Р 54810–2011⁹

Автомобиль и условия движения	Эксплуатационные свойства	Применяемое топливо					
		Газ № 1	Газ № 2	Газ № 3	Газ № 4	Газ № 5	ЖТ ¹
БА3–2215 на шасси «Газель Бизнес» с двигателем УМЗ–А27460 EvoTech; городской ездовой цикл для автомобилей категории М2 по ГОСТ Р 54810–2011 (рис 2 а)	Путевой расход топлива, m , м ³ /км (кг/км)	0,232	0,128	0,142	0,43	0,27	(0,11)
	Запас хода в условиях ЕЦ, S_A , км	172,4	312,5	281,7	93	148,1	438,3
	Выбросы CO ₂ с ОГ, q , г/км	213,2	235,8	254,7	211,9	214,6	343,3
ГАЗель Next «Citiline» с двигателем CUMMINS ISF2,8S4R129; городской ездовой цикл для автомобилей категории М2 по ГОСТ Р 54810–2011 (рис 2 а)	Путевой расход топлива, m , м ³ /км (кг/км)	0,251	0,14	0,156	0,486	0,309	(0,099)
	Запас хода в условиях ЕЦ, S_A , км	159,4	285,7	256,4	82,3	129,4	553,9
	Выбросы CO ₂ с ОГ, q , г/км	230,9	258	280	240	245,9	313,4
ПА3 3203 с двигателем ЗМЗ–5234; городской ездовой цикл для автомобилей категории М3 по ГОСТ Р 54810–2011 (рис 2 б)	Путевой расход, m , м ³ /км (кг/км)	0,544	0,291	0,326	0,994	0,624	(0,256)
	Запас хода в условиях ЕЦ, S_A , км	110,3	206,2	184,0 1	60,4	96,2	278,3
	Выбросы CO ₂ с ОГ, q , г/км	499,9	536	584,7	489,9	496	802,5
¹ Жидкое топливо (бензин для ДВС УМЗ–А27460 EvoTech, ЗМЗ–5234 и дизельное топливо для ДВС CUMMINS ISF2,8S4R129).							

⁹ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

Минимальный путевой расход топлива m (1) в условиях различных ЕЦ достигается на образце газа №2, а максимальный — на образце №4. Для БА3–2215 соответствующий диапазон изменения составляет 3,36 при наименьшем значении 0,128 м³/км, для ГАЗель Next «Citiline» 3,47 при 0,14 м³/км, а для ПА3 3203 — 3,42 при 0,291 м³/км.

Запас хода S_A (2) обратно пропорционален путевому расходу топлива m и составляет от запаса хода на бензине: 21–71 % для БА3–2215, 15–91 % для ГАЗель Next «Citiline» и 22–74 % для ПА3 3203. При расчётах запаса хода газомоторных автомобилей категории М₂ количество баллонов класса КПП–1 объёмом $V_B=0,05$ м³ и максимально допустимым внутренним давлением 200 бар принято $n_B=4$, а для категории М₃ $n_B=6$. Ёмкость топливного бака для категории М₂ составляет $V_{BT}=0,064$ м³, а для М₃ $V_{BT}=0,095$ м³.

Эмиссия диоксида углерода при эксплуатации автобусов на газомоторном топливе по отношению к жидким топливам существенно уменьшается: от 211,9 г/км на образце №4 до 254,7 г/км для БА3–2215, что составляет 62 % и 74 % от удельного выброса CO₂ при движении на бензине; от 230,9 г/км на образце №1 до 280 г/км для ГАЗель Next «Citiline» — это 74 % и 89 % от удельного выброса при движении на дизельном топливе и от 496 г/км на образце №5 до 584,7 г/км для ПА3 3203, что составляет 62 %–73 % от эмиссии на бензине.

Обсуждение. Полученные данные лабораторных исследований отобранных образцов шахтного метана (таблица 2) подтверждают непостоянство его компонентного состава. В частности, объёмная доля CH₄ варьируется от 0,275 на шахте «Комсомолец Донбасса» до 0,485 на шахте им. Чайкина, что составляет 27 % и 50 % соответственно от природного газа, используемого для заправки автомобилей, а также 34 % и 60 % от эталонной газовой смеси по ГОСТ 31371.3–2008¹⁰. Объёмная доля метановых примесей составила до 0,0098 в образце с шахты им. Чайкина. В отобранном газе шахты «Комсомолец Донбасса» значительную часть составляет воздух — по объёму 55 % для ВНС № 2 и 77 % для ВНС № 1, что делает эти источники менее предпочтительными для отбора газомоторного топлива.

В результате анализа данных, полученных в ходе расчётов и приведённых в таблицах 3–5, установлено, что максимальная расчётная потеря мощности автомобильных ДВС при их работе на рассмотренных образцах топлива для искровых двигателей УМЗ–А274–60 EvoTech и ЗМЗ–5234 составила 15 %. При этом для дизельного двигателя CUMMINS ISF2.8S4R129, переоборудованного в газодизель, этот показатель может быть значительно увеличен, что обусловлено снижением коэффициента избытка воздуха (таблица 5) и наличием наддува. Однако без дополнительных исследований детонационной устойчивости этого двигателя, а также прочности его кривошипно-шатунного механизма, подача газа должна ограничиваться.

Установлено, что рассмотренные автомобили в газомоторном исполнении при работе на всех отобранных образцах шахтного метана обладают достаточными тягово-скоростными свойствами для возможности движения в условиях, выбранных ЕЦ по ГОСТ Р 54810–2011¹¹. При этом утилизация шахтного метана путём его использования в качестве топлива позволяет не только сократить поступление этих вредных газов в атмосферу, что, в частности, усиливает парниковый эффект, но и сократить эмиссию CO₂ от автомобильного транспорта, уменьшая его углеродный след.

Общей проблемой при использовании шахтного метана является непостоянство его состава, а также наличие дополнительных примесей в виде воздуха и инертных газов, которые могут составлять значительную объёмную долю. Такое моторное топливо без предварительного обогащения природным газом приводит к необходимости оснащения ДВС системами питания, которые будут обладать увеличенной производительностью (практически втрое) и обратной связью по коэффициенту избытка воздуха с целью поддержания стехиометрического соотношения топливно-воздушной смеси. Ожидается, что стоимость такого оборудования будет превышать стоимость традиционной автомобильной системы хранения и подачи КПП на 50 %. Приведённые в таблице 6 показатели запаса хода могут быть увеличены пропорционально количеству установленных на автомобиль дополнительных баллонов. Однако при массе каждого ≈ 65 кг в заправленном состоянии (на примере КПП–1) настолько же снижается грузоподъёмность (и пассажироместимость) автомобиля. Соответственно, полученные в работе результаты (таблицы 3–6) позволили оценить принципиальную возможность и энергетическую эффективность применения шахтного метана в качестве газомоторного топлива для коммерческого автомобильного транспорта городов Донбасса. Экономическая целесообразность при этом определяется комплексом факторов: стоимостью дегазации, полной стоимостью переоборудования автомобилей, а также принятыми на предприятиях стратегиями осуществления транспортного процесса.

¹⁰ ГОСТ 31371.3–2008. Газ природный. Определение состава методом газовой хроматографии с оценкой неопределённости. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200068109> (дата обращения: 21.05.2025).

¹¹ ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

Заключение. Таким образом, в результате теоретического анализа, выполненного на основе данных лабораторных исследований, установлено, что шахтный метан угольных месторождений Донбасса возможно использовать в качестве газомоторного топлива для питания двигателей внутреннего сгорания моделей УМЗ–А274–60 EvoTech, ЗМЗ–5234, CUMMINS ISF2.8S4R129, применяемых на коммерческих автотранспортных средствах моделей БАЗ–2215, ПАЗ 3203 и ГАЗель Next «Citiline». Имеющее место при этом снижение максимальной эффективной мощности не препятствует движению автомобилей в условиях городских ЕЦ по ГОСТ Р 54810–2011¹², однако требует оснащения модернизированной системой приготовления топливно-воздушной смеси.

Настоящая работа является частью выполняемого авторами научного исследования. В рамках дальнейшей работы планируется реализация следующих направлений исследования:

1. Уточнение эффективных показателей автомобильных ДВС при работе на шахтном метане. Для этого запланированы моторные испытания в лаборатории специализированного научно-технического центра «Механизация транспортных, строительных и коммунальных работ» ФГБОУ ВО «ДОННАСА» на модернизированном стенде КИ–5543 ГОСНИТИ. Испытания будут проводиться как на установившихся, так и на неустойчивых режимах с применением разработанного авторами устройства для отбора проб отработанных газов (патент РФ RU 227257 U1).
2. Разработка математических моделей скоростных характеристик ДВС и их экологических показателей для последующей оценки эксплуатационных свойств автотранспортных средств.
3. Проведение комплексной оценки экономической эффективности перевода коммерческого автомобильного транспорта Донбасса на газомоторное топливо.
4. Определение величины предотвращенного экологического ущерба окружающей среде.

Список литературы / References

1. Qingdong Qu, Hua Guo, Rao Balusu, Methane Emissions and Dynamics from Adjacent Coal Seams in a High Permeability Multi-Seam Mining Environment. *International Journal of Coal Geology*. 2022;253:103969. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.103969>
2. Songling Jin, Wei Gao, Zichao Huang, Mingshu Bi, Haipeng Jiang, Rongjun Si, et al. Suppression Characteristics of Methane/Coal Dust Explosions by Active Explosion Suppression System in the Large Mining Tunnel. *Fire Safety Journal*. 2024;150(A):104251. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104251>
3. Pengfei Ji, Haifei Lin, Shugang Li, Xiangguo Kong, Xu Wang, Jingfei Zhang, et al. Technical System and Prospects for Precise Methane Extraction in the Entire Life Cycle of Coal Mining under the Goal of “Carbon Peak and Carbon Neutrality”. *Geoenergy Science and Engineering*. 2024;238:212855. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.212855>
4. Кузнецов А.Н., Коляда Д.А. Применение газового топлива для автомобилей. В: *Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110-летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» «Инновационные технологии и технические средства для АПК», Воронеж, 10–11 ноября 2022 г.* Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I; 2022. С. 265–269.
5. Kuznetsov AN, Kolyada DA. The Use of Gas Fuel for Cars. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Specialists Dedicated to the 110th Anniversary of Voronezh State Agrarian University Named after Emperor Peter I “Innovative Technologies and Technical Means for Agriculture”, Voronezh, November 10–11, 2022.* Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great; 2022. P. 265–269. (In Russ.)
6. Ander Ruiz Zardoya, Inaki Lorono Lucena, Inigo Oregui Bengoetxea, Jose A Orosa, Research on the New Combustion Chamber Design to Operate with Low Methane Number Fuels in an Internal Combustion Engine with Pre-Chamber. *Energy*. 2023;275:127458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127458>
7. Славина Ю.А., Возов Д.А. Применение природного газа в качестве топлива на автомобильном транспорте. В: *Труды XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок, безопасности движения и эксплуатации транспортных средств» Саратов, 18 апреля 2019 года.* Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; 2019. С. 359–363.
8. Slavina YuA, Vozov DA. Application of Natural Gas as Fuel in Road Transport. In: *Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference “Topical Issues of Organization of Road Transportation, Traffic Safety and Operation of Vehicles” Saratov, April 18, 2019.* Saratov: Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin; 2019. P. 359–363. (In Russ.)

¹² ГОСТ Р 54810 2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093157> (дата обращения: 21.05.2025).

7. Пазюченко М.А. Экономическая и экологическая эффективность добычи метана из угольных пластов. *Экономические системы*. 2023;16(2):173–181. <https://doi.org/10.29030/2309-2076-2023-16-2-173-181>
- Pazyuchenko MA. Economic and Environmental Efficiency of Methane Extraction from Coal Seams. *Ekonomicheskie Sistemy*. 2023;16(2):173–181. (In Russ.) <https://doi.org/10.29030/2309-2076-2023-16-2-173-181>
8. Vigil DA, Johnson JrRL, Tauchnitz J. Improved Estimation Methods for Surface Coal Mine Methane Emissions for Reporting, Beneficial Use, and Emission Reduction Purposes and Relative to Australia's Safeguard Mechanisms. *Journal of Environmental Management*. 2025;376:124366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124366>
9. Brodny J, Felka D, Tutak M. The Use of the Neuro–Fuzzy Model to Predict the Methane Hazard during the Underground Coal Mining Production Process. *Journal of Cleaner Production*. 2022;368:133258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133258>
10. Шилов А.А., Храмова А.М. Утилизация и использование шахтного метана для получения тепла и электроэнергии. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(S4):85–89.
- Shilov AA, Khrantsova AM. Utilization and Use of Mine Methane for Heat and Electricity Generation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008;(S4):85–89. (In Russ.)
11. Нагайцев И., Петрова Т. Сравнительный анализ перспективных технологий снижения выбросов метана на угольных шахтах. *Энергетическая политика*. 2024;(1(192)):38–57. URL: <https://energypolicy.ru/wp-content/uploads/2024/02/ep-%E2%84%961192-1.pdf> (дата обращения: 27.06.2025).
- Nagaytsev I, Petrova T. Comparative Analysis of Promising Abatement Technologies Greenhouse Gas Emissions from Coal Mines. *Energy Policy*. 2024;(1(192)):38–57. (In Russ.) URL: <https://energypolicy.ru/wp-content/uploads/2024/02/ep-%E2%84%961192-1.pdf> (accessed: 27.06.2025).
12. Тайлаков О.В., Застрелов Д.Н., Уткаев Е.А., Соколов С.В., Кормин А.Н., Смыслов А.И. Направления утилизации шахтного метана. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015;(6(112)):62–67. URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2977> (дата обращения: 27.06.2025).
- Tailakov OV, Zastrelov DN, Utkayev EA, Sokolov SV, Kormin AN, Smyslov AI. Prospects of the Coal Mine Methane Utilization. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2015;(6(112)):62–67. (In Russ.) URL: <https://vestnik.kuzstu.ru/index.php?page=article&id=2977> (accessed: 27.06.2025).
13. Константинова М.С. Пути извлечения и способы промышленного использования шахтного метана для энергетических целей. *Вестник современных исследований*. 2019;(1.8(28)):95–99.
- Konstantinova MS. Ways of Extraction and Industrial Use of Coal Mine Methane for Energy Purposes. *Vestnik Sovremennykh Issledovaniy*. 2019;(1.8(28)):95–99. (In Russ.)
14. Дурнин М.К. Выбор эффективных технологий утилизации шахтного метана для повышения промышленной безопасности угольных шахт. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007;(S13):415–429.
- Durnin MK. The Choice of Effective Technologies for the Utilization of Coal Mine Methane to Improve the Industrial Safety of Coal Mines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(S13):415–429. (In Russ.)
15. Белошицкий М.В., Троицкий А.А. Использование шахтного метана в качестве энергоносителя. *Турбины и дизели*. 2006;(6):2–9. URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2108> (дата обращения: 27.06.2025).
- Beloshitskii MV, Troitskii AA. The Use of Coal Mine Methane as an Energy Carrier. *Turbines & Diesels*. 2006;(6):2–9. (In Russ.) URL: <http://www.turbine-diesel.ru/rus/node/2108> (accessed: 27.06.2025).
16. Строков А.П., Левтеров А.М., Нечволод П.Ю. Утилизация шахтного метана в экологичной когенерационной установке с поршневым ДВС. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. 2010;(48):89–93.
- Strokov AP, Levterov AM, Nechvolod PYu. Recycling of Mine Methane in Ecological Cogeneration Plant with Piston ICE. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2010;(48):89–93. (In Russ.)
17. Кулешов А.А. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС. Дис. докт. техн. наук. Москва; 2012. 235 с.
- Kuleshov AA. *Development of Calculation Methods and Optimization of Internal Combustion Engine Work Processes*. Dr. Sci. (Eng.) diss. Moscow; 2012. 235 p. (In Russ.)
18. Gorozhankin SA, Bumaga AD, Savenkov NV. Improving Car Fuel Efficiency by Optimising Transmission Parameters. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2019;16(3):7019–7033. <https://doi.org/10.15282/ijame.16.3.2019.14.0526>

Об авторах:

Никита Владимирович Савенков, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286128, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), n.v.savenkov@donnasa.ru

Екатерина Леонидовна Головатенко, старший преподаватель кафедры «Техносферная безопасность» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286128, Донецкая Народная Республика, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2.), [SPIN-код](#), [ORCID](#), e.l.golovatenko@donnasa.ru

Заявленный вклад авторов:

Н.В. Савенков: разработка концепции, научное руководство.

Е.Л. Головатенко: формальный анализ, написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Nikita V. Savenkov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automobile Transport, Service and Operation, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina St., Makeyevka, Donetsk People's Republic, 286128, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), n.v.savenkov@donnasa.ru

Ekaterina L. Golovatenko, Senior Lecturer of the Technosphere Safety Department, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (2, Derzhavina St., Makeyevka, Donetsk People's Republic, 286128, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), e.l.golovatenko@donnasa.ru

Claimed Contributorship:

NV Savenkov: conceptualization, supervision.

EL Golovatenko: formal analysis, writing – original draft preparation, visualization.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 16.06.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 11.07.2025

Принята к публикации / Accepted 24.07.2025