

Научная статья

УДК 504.61:656; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-224-237

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ СОЦИАЛЬНЫХ ИЗДЕРЖЕК ОТ УГЛЕРОДНЫХ ВЫБРОСОВ ГИБРИДНЫМИ АВТОМОБИЛЯМИ

✉ **Раков Вячеслав Александрович.**

Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия

✉ vyacheslav.rakov@mail.ru

Аннотация. В России, как и многих странах мира, обсуждается введение экономического эквивалента социальных издержек от выбросов углекислого газа. Это означает, что вред от любого технологического процесса, связанного с выбросами CO₂, можно оценить в денежном эквиваленте, как и пользу от снижения этих выбросов. Следовательно, и затраты на любую экологически бережливую технологию могут быть оправданы в стоимостном CO₂-эквиваленте. В связи с этим в статье сравнивается гипотетическое снижение социальных издержек от углеродных выбросов и снижение экономических издержек от использования гибридных автомобилей в сравнении с автомобилями, имеющими лишь двигатель внутреннего сгорания. При этом рассматриваются гибридные автомобили с последовательным, параллельным и последовательно-параллельным типами комбинированных энергоустановок. Также в сравнении участвуют автомобили, использующие в качестве топлива метан. В результате сравнения установлено снижение социальных издержек в стоимостном CO₂-эквиваленте и снижение экономических затрат от использования более экономичных сравниваемых автомобилей. Использование гибридных автомобилей оправдано не только благодаря экономии топлива при эксплуатации, но и с точки зрения снижения социальных издержек от углеродных выбросов.

Ключевые слова: углеродная эмиссия, CO₂-эквивалент, гибридные автомобили, экономическая выгода, социальные издержки, сравнение

Для цитирования: Раков В.А. Оценка снижения социальных издержек от углеродных выбросов гибридными автомобилями // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 1 (77). С. 224–237. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-224-237

Scientific article

ASSESSING THE REDUCTION OF SOCIAL COSTS FROM CARBON EMISSIONS OF HYBRID VEHICLES

✉ **Rakov Viacheslav A.**

Vologda state university, Vologda, Russia

✉ vyacheslav.rakov@mail.ru

Abstract. In Russia, as in many countries worldwide, the introduction of an economic equivalent of the social costs of carbon dioxide emissions is being discussed. This means that the harm from any technological process associated with CO₂ emissions can be estimated in monetary terms, as can the benefits of reducing these emissions. Consequently, the costs of any environmentally friendly technology can be justified in terms of CO₂ equivalent. In this regard, this article compares a hypothetical reduction in the social costs of carbon emissions and a reduction in the economic costs of using hybrid vehicles compared to vehicles with an internal combustion engine only. Hybrid vehicles with series, parallel, and series-parallel combined power plants are considered. Vehicles using methane as fuel are also included in the comparison. The comparison revealed a reduction in social costs in terms of CO₂ equivalent and a reduction in the economic costs of using more fuel-efficient comparable vehicles. The use of hybrid vehicles is justified not only due to fuel savings during operation but also in terms of reducing the social costs of carbon emissions.

Keywords: carbon emissions, CO₂ equivalent, hybrid vehicles, economic benefits, social costs, comparison

For citation: Rakov V.A. Assessing the reduction of social costs from carbon emissions of hybrid vehicles // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere*. 2026. № 1 (77). P. 224–237. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-1-224-237

Введение

Вопросы глобального потепления климата неизбежно приводят к необходимости снижения выброса парниковых газов во всех сферах хозяйственной деятельности, особенно там, где используются углеводородные ископаемые. Автомобильный транспорт во всем мире является причиной образования 15 % валовых углеродных выбросов, прежде всего углекислого газа CO₂. В концепции развития ряда стран предусмотрено постепенное снижение углеродных выбросов за счет замещения энергетических технологий на более безопасные [1] или снижения расхода энергии за счет повышения эффективности энергетических и транспортных систем [2]. В 2021 г. в России также утверждена Стратегия социально-экономического развития страны с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.¹. Стратегия предусматривает расширение использования более экологичной энергетики, производств, технологий экономичного использования ресурсов, включая транспортную сферу.

Снижение углеродных выбросов является основным стимулятором появления новых более эффективных двигателей на транспорте. Этот процесс происходит на основе государственных и межгосударственных норм и договоренностей. Наиболее сильно экологическое нормирование развито в странах Европейского союза (ЕС), США, Норвегии и Китае, где введены или планируется введение ограничений на выбросы CO₂ от автомобилей массового использования. В странах ЕС с 2019 г. установлена норма выброса для легковых автомобилей 95 г/км в условиях стендовых испытаний по циклу WLTC. Так как рынок ЕС является крупнейшим в мире, то все глобальные производители, в том числе японские и корейские, вынуждены также реализовывать стратегию постепенного снижения углеродных выбросов.

В качестве переходной технологии от автомобилей с двигателем внутреннего сгорания к электромобилям автопроизводители рассматривают комбинированные электромеханические энергоустановки – гибридные двигатели [3]. Наличие электропривода в таких энергоустановках позволяет реализовать новые возможности: обеспечить оптимальный режим работы двигателя внутреннего сгорания; сохранять и использовать энергию торможения, обеспечить возможность движения с выключенным двигателем внутреннего сгорания. Новые свойства позволяют гибридным автомобилям иметь более высокую экологическую безопасность по сравнению с бензиновыми автомобилями [4].

Набирающие в некоторых странах популярность электромобили не выбрасывают загрязняющих веществ при эксплуатации, однако проблема экологичности производства энергии электростанциями при этом никуда не делась [5]. Расчеты показывают, что выбросы углерода от их использования не ниже, чем у автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, а в некоторых случаях даже выше [6]. Аналитические исследования выбросов CO₂ легковыми автомобилями представлены авторами В.А. Раковым, А.А. Капустиным [7, 8].

Если бы развитие технологий естественным образом приводило к снижению их стоимости и одновременному повышению экологичности, то это являлось бы естественным законом развития. Однако все происходит не совсем так. Повышение экологической

¹ Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 29 окт. 2021 г. № 3052-р.) // Правительство Российской Федерации. URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 10.01.2026).

безопасности и топливной экономичности, как правило, влечет за собой рост экономических издержек на новую технологию. Например, водородные двигатели не выбрасывают загрязняющих веществ, однако цена этой экологичности настолько высока, что не позволяет обосновать экономическое использование автомобиля с таким двигателем. А тех же объемов выбросов можно добиться другими более дешевыми технологиями, например использованием метана в качестве топлива. Таким образом, речь идет о балансе приемлемых затрат и требуемого снижения выбросов. На графике (рис. 1) представлена суть этого баланса.



Рис. 1. График баланса затрат на новую технологию и снижения социальных издержек

Рост стоимости технологии приводит к снижению углеродных выбросов. Но одновременно с этим растут и социальные издержки от использования этой технологии. В какой-то момент затраты на технологию снижения выбросов оказываются больше полученного снижения социальных издержек. Графики в этой точке пересекаются. Понимание баланса в таком случае говорит, что затраты на использование технологии не должны быть больше сниженных социальных издержек. Это позволяет обосновать эффективность внедрения технологий снижения углеродных выбросов.

Определение величины социальных издержек является непростой задачей [9]. Они зависят от природных и техногенных рисков, уровня заболеваемости, экологической, политической и социальной обстановки в стране. Величина социальных издержек от выброса углерода определяется на государственном уровне и позволяет выстраивать экологическую стратегию на длительный период времени [10]. Поиски вариантов определения компромиссных решений в оценке стоимости риска углеродных выбросов рассматривались автором D.B. Chen. и др. [11]. Авторы R.D. Bressler [12], N. Kaufman [13] и В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина [14] прогнозируют влияние социальных издержек от углеродных выбросов в будущем. Известна величина социальных издержек в разных странах мира [15–17]. В табл. 1 приведены значения для некоторых из них.

Таблица 1

Величина социальных издержек при выбросе 1 т CO₂-эквивалент

США	Канада	Великобритания	Страны Евросоюза
36 долл.	28 долл.	10–38 фунтов	60 евро

Выбросы углерода в США одни из самых высоких во всем мире [15]. Экономический эквивалент социальных издержек от углеродных выбросов в США составляет 36 долл. В странах ЕС одну тонну углеродных выбросов оценивают в 60 евро социальных издержек. Экологические требования здесь традиционно одни из самых строгих.

Декларирование социальных издержек от выбросов углерода позволяет более эффективно выстраивать законодательство по снижению эмиссии парниковых газов [16]. Вопросы определения социальной стоимости углеродных выбросов по отношению к затратам на его улавливание рассматривались А.Н. Steele и др. [17].

Объекты исследования

В России на сегодняшний день нет официальной величины стоимости социальных издержек от углеродной эмиссии. Это можно объяснить тем, что географически плотность населения очень низкая, а эмиссия CO₂ не такая высокая. В связи с этим для примера принят показатель, используемый в странах ЕС – 60 Евро за 1 т CO₂, или 5 520 руб. по курсу ЦБ РФ на начало 2026 г. Таким образом, эмиссия 1 т CO₂ в денежном эквиваленте гипотетически наносит социальный ущерб в 5 520 руб.

Теперь возникает вопрос: использование более дорогих гибридных автомобилей может снизить социальный ущерб от эмиссии углерода в денежном эквиваленте? С одной стороны, снижение ущерба обусловлено уменьшением выбросов CO₂ из-за более низкого потребления топлива, с другой стороны, издержки на покупку автомобиля также растут. Для ответа на этот вопрос требуется определить снижение социальных издержек при эксплуатации гибридных автомобилей по сравнению со стандартным автомобилем с бензиновым двигателем и сопоставить их с разницей в стоимости их приобретения.

Для проведения сравнения использованы автомобили категории М1, относящиеся к самому массовому классу. Все сравниваемые автомобили имеют автоматическую трансмиссию.

В качестве стандартного бензинового автомобиля использована модель Toyota Corolla 2018, оснащенная автоматической бесступенчатой трансмиссией CVT. Средний рекомендованный (декларируемый) расход топлива в такой комплектации составляет 6,3 л/100 км. Однако согласно государственным нормам эксплуатационный расход равен 9,0 л/100 км. Обозначим в сравнении этот автомобиль как базовый с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Для сравнения с ним использовано три типа гибридных автомобилей с разными схемами передачи энергии [18].

Гибридный автомобиль с последовательной схемой передачи энергии. Среди серийных легковых автомобилей такая схема использовалась только на подзаряжаемых гибридах. Наиболее распространенный пример BMW i3 REX с автономной генераторной установкой на основе двигателя внутреннего сгорания. Рекомендованный (декларируемый) расход топлива BMW i3 REX составляет 0,6 л/100 км. Однако практические испытания в смешанном режиме движения без использования электроэнергии для заряда от внешней электросети показали средний эксплуатационный расход топлива 5,0 л/100 км.

Гибридный автомобиль с параллельной схемой передачи энергии. К такому типу относятся автомобили японских, европейских, американских производителей. Наиболее близко по характеристикам подходит Honda Insight. Этот автомобиль также снабжен автоматической бесступенчатой трансмиссией CVT, а двигатели соответствуют ему по мощности. Средний нормируемый эксплуатационный расход топлива Honda Insight в смешанном режиме движения составляет 5,5 л/100 км.

Гибридный автомобиль с последовательно-параллельной (смешанной) схемой передачи энергии. Этот тип является самым массовым среди гибридных. Он выпускается компанией Toyota с 1998 г. Всего в мире выпущено более 30 млн гибридов смешанного типа. Аналогом базового автомобиля является Toyota Prius 1.8, средний эксплуатационный расход топлива которого составляет 4,6 л/100 км, он и принят для расчетов.

Дополнительно в сравнение включен автомобиль, работающий на природном газе метане. К сожалению, серийных автомобилей на сжатом природном газе (КПГ) мало. Для оценки использованы характеристики серийного автомобиля Lada Vesta CNG. Средний нормируемый эксплуатационный расход природного газа Lada Vesta CNG составляет 7,5–9 м³ природного газа и примерно 1 л бензина на 100 км. Масса и размеры этого автомобиля соответствуют принятому базовому автомобилю с ДВС.

Обоснование методики расчета и результаты расчетной оценки снижения социальных издержек от углеродных выбросов гибридными автомобилями

Вопросы топливной эффективности гибридных автомобилей и их выбросы рассматривались ранее исследователями Т.К. Gannavaram и др. [19] и Yu. Huang и др. [20]. Mamala J. и др. рассматривал вопросы эффективности гибридных автомобилей с точки зрения удельных показателей выбросов [21].

Эмиссия углеродных выбросов от автотранспорта определяется по разным нормированным методикам. Например, определение эмиссии от автотранспортных потоков, а также стендовые и ходовые испытания. Для определения эмиссии от одного автомобиля использована методика оценки по количеству израсходованного топлива и нормированных показателей выбросов загрязняющих веществ. Ранее эта методика использовалась для сравнения гибридных, бензиновых и газовых автомобилей [22].

Главной проблемой в этом случае является определение расхода топлива. Заводские показания в реальных условиях не достижимы, и в табл. 2 они указаны для справки [23]. Более реальными являются нормы, установленные на основе дорожных испытаний с целью нормирования расхода топлива на транспортных предприятиях. В данном случае использованы нормы расхода топлива и смазочных материалов, установленные Министерством транспорта России, они также указаны в табл. 2 и приняты для расчета. Допущением в данном случае является отсутствие поправочных коэффициентов для учета условий эксплуатации и климата.

Для перевода израсходованного топлива в эмиссию CO₂ (M_{CO_2}) использована формула:

$$M_{CO_2} = Q_T \times M_{уд.}/100, \text{ г/км},$$

где Q_T – эксплуатационный расход топлива; $M_{уд.}$ – удельные выбросы CO₂ от сгорания топлива.

Из рекомендованных справочных норм известно, что $M_{уд.}$ для топлива равен: бензин 3,18 – кг/л; метан – 2,75 кг/кг [24]. Плотность метана 0,716 кг/м³.

Таблица 2

Сравнение выбросов углерода от разных типов автомобилей категории M_1

Тип двигателя	Расход топлива рекомендованный смешанный, л/100 км (м ³ /100 км)	Расход топлива эксплуатационный смешанный, л (м ³ /100 км)	M_{CO_2} , по эксплуатационному расходу, кг/км	M_{CO_2} по отношению к ДВС, %
ДВС	6,3	9,0	0,207	100
ДВС на метане	7,5	10	0,147	71
Последовательный гибридный	0,6	5,0	0,115	56
Параллельный гибридный	3,5	5,5	0,126	61
Смешанный гибридный	3,9	4,6	0,106	51

В табл. 2 также приведены сравнительные результаты выбросов CO₂ автомобилями относительно базового автомобиля с ДВС. Более наглядно эти результаты показаны на гистограмме (рис. 2).

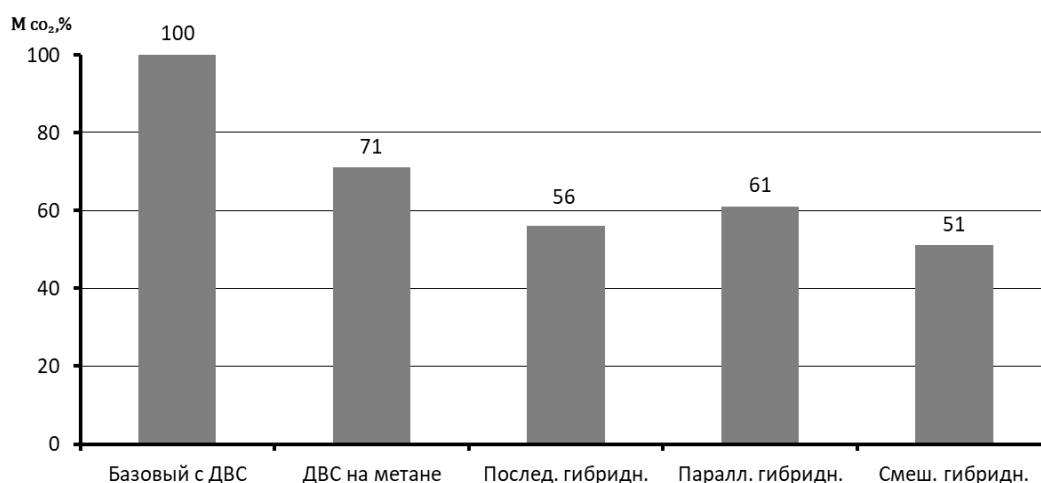


Рис. 2. Гистограмма снижения эмиссии CO₂ гибридных автомобилей по отношению к базовому автомобилю с ДВС

Три гибридных автомобиля имеют эмиссию CO₂ на 39–49 % ниже, чем базовый с ДВС. Автомобиль с ДВС на метане также выбрасывает CO₂ на 30 % меньше ввиду особенностей процесса горения природного газа. Рассмотрим эмиссию CO₂ более детально на протяжении всего периода эксплуатации. Для этого произведем расчет выбросов для диапазона 50–300 тыс. км пробега. Пробег 300 тыс. км принят как средний за период жизни для всех автомобилей.

$$M_{CO_2}^{\text{Дист.}} = M_{CO_2} \times L_i / 1000, \text{ т,}$$

где $M_{CO_2}^{\text{Дист.}}$ – эмиссия CO₂ за заданный пробег (г/км); L_i – заданный пробег (км).

В табл. 3 приведены результаты расчета для каждого сравниваемого автомобиля.

Таблица 3

Выбросы CO₂ при эксплуатации, т

Тип двигателя	Выбросы CO ₂ , по эксплуатационному расходу, кг/км	Пробег, тыс. км					
		50	100	150	200	250	300
ДВС	0,38	18,8	37,7	56,5	75,3	94,1	113,0
ДВС на метане	0,36	18,1	36,2	54,3	72,4	90,5	108,6
Последовательный гибридный	0,21	10,5	20,9	31,4	41,8	52,3	62,8
Параллельный гибридный	0,23	11,5	23,0	34,5	46,0	57,5	69,0
Смешанный гибридный	0,19	9,6	19,2	28,9	38,5	48,1	57,7

Масса выбросов в тоннах позволяет сопоставить их с базовым автомобилем в абсолютных единицах. Данные из табл. 3 приведены на графике (рис. 3).

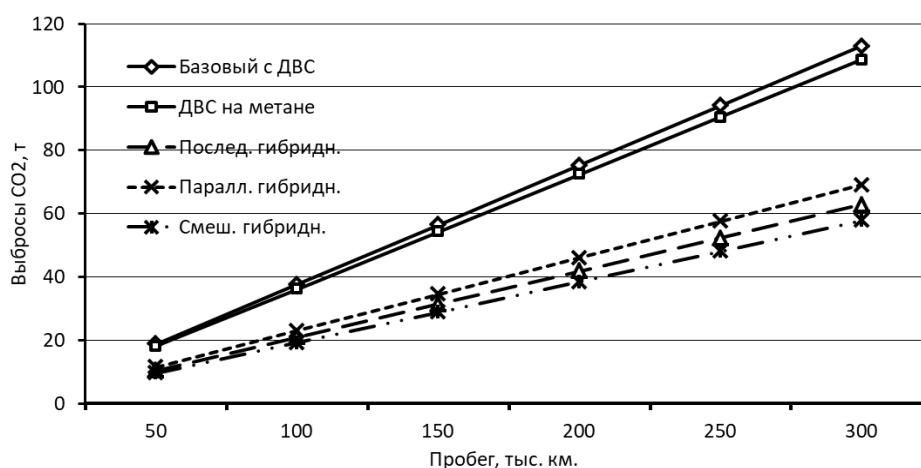


Рис. 3. График эмиссии CO₂ сравниваемых автомобилей в интервале пробега 50–300 тыс. км

Как следует из графика, в процессе эксплуатации гибридные автомобили имеют значительно более низкую эмиссию CO₂. К пробегу в 300 тыс. км разница в выбросах составляет 43–55 т.

Для дальнейшего расчета данные сведены в отдельную табл. 4, где указана разница эмиссии CO₂ по сравнению с базовым автомобилем.

Таблица 4

Разница эмиссии CO₂ по сравнению с базовым автомобилем (ΔM_{CO_2}), т

Тип двигателя	Пробег, тыс. км					
	50	100	150	200	250	300
ДВС на метане	0,7	1,5	2,2	2,9	3,7	4,4
Последовательный гибридный	8,4	16,7	25,1	33,5	41,8	50,2
Параллельный гибридный	7,3	14,6	22,0	29,3	36,6	43,9
Смешанный гибридный	9,2	18,4	27,6	36,8	46,0	55,2

Теперь отобразим снижение эмиссии сравниваемых автомобилей на отдельном графике (рис. 4).

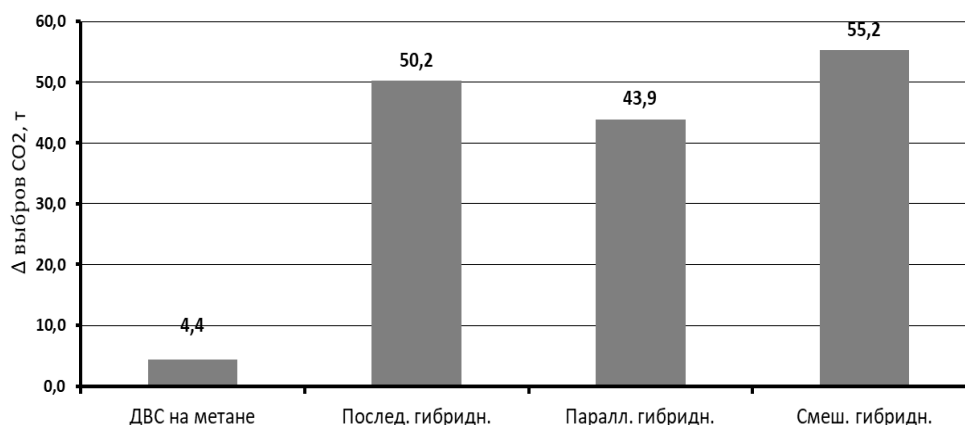


Рис. 4. Гистограмма снижения выбросов CO₂ сравниваемых автомобилей при пробеге 300 тыс. км по отношению к базовому автомобилю с ДВС

Важно отметить, что эмиссия углерода на этапе производства и утилизации автомобилей была проанализирована ранее. На долю этапа эксплуатации приходится более 90 % эмиссии загрязняющих веществ на всех этапах жизненного цикла. Разница в эмиссии CO₂ при производстве гибридных автомобилей и автомобилей с ДВС мала и не вносит существенный вклад в сравнение.

Низкая эмиссия CO₂ сравниваемых типов автомобилей должна способствовать и положительному их влиянию на снижение социальных издержек от загрязнения окружающей среды.

Полученные значения снижения эмиссии CO₂ – сравниваемых автомобилей (M_{CO_2}) и удельная стоимость социальных издержек ($C_{CO_2}^{уд.} = 5520$ руб.) от выбросы одной тонны в CO₂-эквивалента позволяют вычислить снижение социальных издержек сравниваемых автомобилей в денежном эквиваленте.

$$C_{CO_2} = C_{CO_2}^{уд.} \times M_{CO_2}.$$

Полученные значения занесены в табл. 5.

Таблица 5

Снижение социальных издержек (C_{CO_2}) от эмиссии сравниваемых автомобилей по сравнению с базовым с ДВС, тыс. руб.

Тип двигателя	Пробег, тыс. км					
	50	100	150	200	250	300
ДВС на метане	4	8	12	16	20	24
Последовательный гибридный	46	92	139	185	231	277
Параллельный гибридный	40	81	121	162	202	243
Смешанный гибридный	51	102	152	203	254	305

Результаты расчета показывают, что за весь условный жизненный цикл снижения социальных издержек составляет 243–305 тыс. руб.

Если рассуждать о социальных издержках от выброса углерода в денежном эквиваленте, то и экономические издержки на приобретение более дорогих гибридных автомобилей выше, и в данном случае за них платят покупатели. В табл. 6 показана разница в стоимости сравниваемых автомобилей по сравнению с базовым бензиновым. Как было установлено ранее [25], разница в стоимости автомобиля с бензиновым ДВС и гибридного аналога составляет 18 %.

Таблица 6

Разница в первоначальной стоимости базового автомобиля с ДВС и сравниваемых автомобилей

Тип двигателя	Цена, тыс. руб.	Δ цены к бензиновому, тыс. руб.
ДВС	2 024	–
ДВС на метане	2 484	150
Последовательный гибридный	3 496	594
Параллельный гибридный	2 300	391
Смешанный гибридный	2 484	422

В процессе эксплуатации владельцы получают выгоду от более низкого расхода топлива по сравнению с бензиновым автомобилем с ДВС [26]. Это также необходимо учитывать.

Вопрос окупаемости экономических издержек от покупки и эксплуатации гибридных автомобилей также пересекается с социальными издержками. Высокие экономические издержки должны оправдывать себя.

И здесь необходимо понимание окупаемости автомобилей в процессе их эксплуатации. Из предыдущих исследований, проведенных авторами, известно, что на пробегах от 50 до 250 тыс. км гибридные автомобили начинают окупать свою завышенную стоимость [27]. Связав табл. 6 и разницу в затратах на эксплуатацию сравниваемых автомобилей по сравнению с базовым автомобилем, получим ценовую эффективность. В табл. 7 приведены результаты этого анализа. Отрицательные значения говорят об экономических издержках, положительные – о полученной выгоде.

Таблица 7

Экономическая выгода от эксплуатации сравниваемых автомобилей, руб.

Тип двигателя	Пробег, тыс. км					
	50	100	150	200	250	300
ДВС на метане	-33	85	203	320	438	555
Последовательный гибридный	-464	-334	-204	-74	56	186
Параллельный гибридный	-277	-164	-50	64	178	292
Смешанный гибридный	-279	-136	7	150	293	436

График на рис. 5 наглядно показывает, как меняется окупаемость сравниваемых автомобилей в зависимости от их пробега.

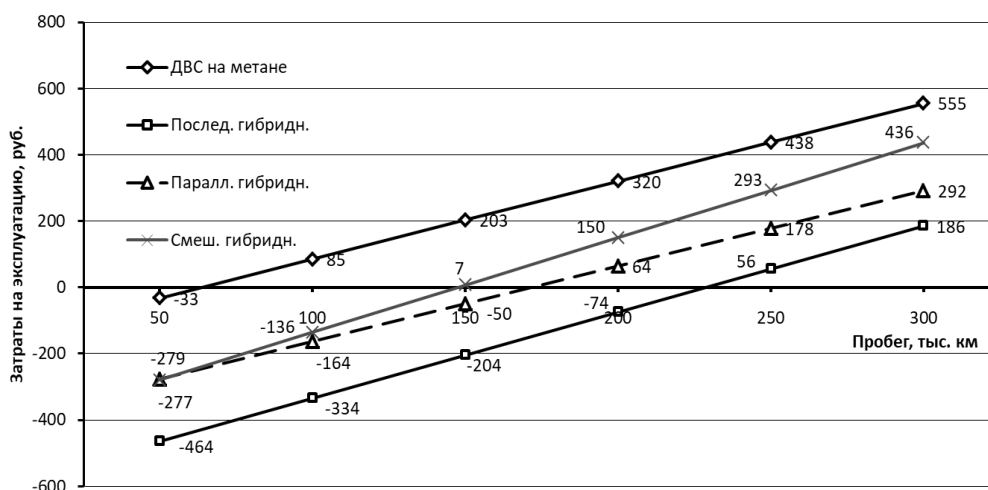


Рис. 5. График окупаемости сравниваемых автомобилей в зависимости от их пробега

Из графика также следует, что дольше всех затраты на покупку оправдывает последовательный гибрид. Однако это расчет сделан для эксплуатации на бензине. Последовательный гибрид является подзаряжаемым и, вероятно, будет передвигаться на более дешевой электрической тяге. Соотношение возможного пробега на электричестве и на бензине оценить достаточно сложно. Влияние электростанционной инфраструктуры на социальные издержки также пока оценить достаточно сложно.

Гибридные автомобили с неподзаряжаемой параллельной и смешанной энергоустановкой окупают вложения в них уже на пробегах 150–170 тыс. км и к пробегу 300 тыс. км дополнительно снижают экономические издержки до 400 тыс. руб.

Также нужно отметить, что метан как топливо также экономически выгоден из-за низких первоначальных затрат на переоборудование.

Теперь необходимо ответить на вопрос: как гибридные автомобили влияют на социальные издержки от выбросов углерода? Для этого сопоставим снижение социальных экологических издержек из табл. 5 и экономических издержек из табл. 7. Результаты сопоставления приведены на гистограмме (рис. 6).

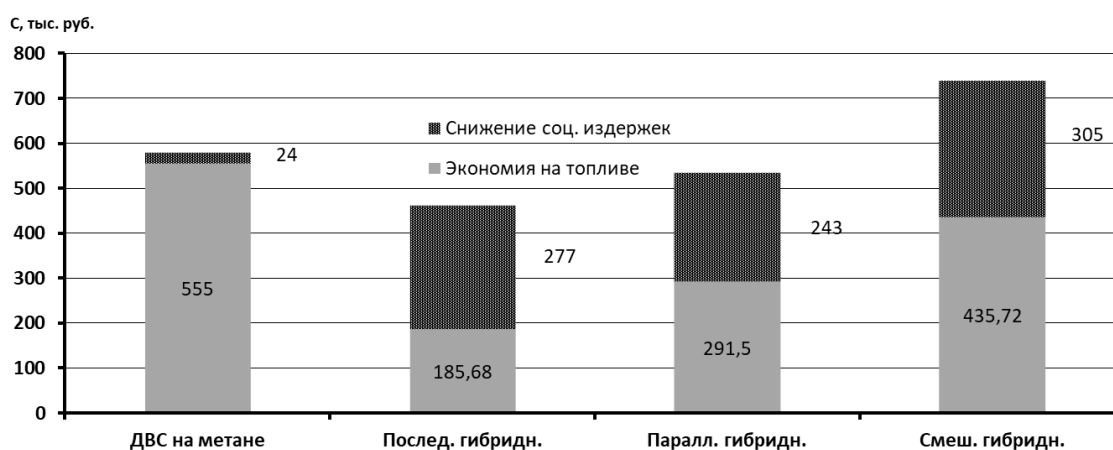


Рис. 6. Гистограмма снижения издержек при эксплуатации сравниваемых автомобилей за 300 тыс. км пробега

Из гистограммы следует, что экономическая выгода от эксплуатации гибридных автомобилей сопоставима с экономическим эквивалентом снижения социальных издержек от выбросов CO₂.

Заключение

Исходя из представленного анализа с учетом принятых условий, эксплуатация гибридных автомобилей экономически обоснована с точки зрения снижения социальных издержек от выбросов CO₂. При этом снижение социальных издержек от выбросов CO₂ сопоставимо с экономической выгодой от эксплуатации за счет экономии на топливе.

Результаты исследования могут быть полезны при формировании направлений развития автомобильного транспорта в Российской Федерации в ключе принятой Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. В случае принятия в России экономического эквивалента социальных издержек от выбросов CO₂ приведенная методика оценки позволит более точно выстраивать механизмы стимулирования развития автомобильного транспорта.

Список источников

1. Pistoia G. Electric and hybrid vehicles. power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. Great Britain, Oxford: The Netherlands Linacre House. 2010. 645 p.
2. Trofimenko Yu.V., Komkov V.I., Donchenko V.V. Methods and results of forecasting number and structure of motor fleet in the Russian Federation by types of engine and fuel used for calculation of greenhouse gases emission till 2050 // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020. Vol. 8. № 6. P. 2707–2711. DOI: 10.30534/ijeter/2020/79862020

3. Hybrid electric vehicle specific engines: State-of-the-art review / Yu. Wang [et al.] // *Energy Reports*. 2022. № 8. P. 832–851. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.265
4. Hassouna F.M.A., Al-Sahili K. Environmental impact assessment of the transportation sector and hybrid vehicle implications in Palestine // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 19. P. 7878. DOI: 10.3390/SU12197878
5. Assessment of feasibility of using the existing electric power infrastructure for charging electric and hybrid vehicles / V. Rakov // *E3S Web of Conferences*. 2020.
6. Kapustin A., Rakov V.A. Results of assessing CO₂ emissions from e-vehicles in case of their possible switching to electricity // *Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018)*. 2018. Vol. 36. P. 266–273.
7. Раков В.А., Зуев М.С. Аналитические исследования выбросов CO₂ легковыми транспортными средствами при движении по циклу WLTC // *Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. С. 189–193.*
8. Капустин А.А., Раков В.А. Сравнение выбросов загрязняющих веществ от автомобилей и различных энергетических установок // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2017. № 6 (60). С. 53–60.
9. Q&A: The social cost of carbon // *Carbon Brief*. 2017-02-14. Retrieved 2019-11-07.
10. Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis / P. Wang // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 209. P. 1494–1507. S2CID 158145495. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.058
11. Chen D.B., Van Der Beek J., Cloud J. Hypothesis for a Risk Cost of Carbon: Revising the Externalities and Ethics of Climate Change // *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy*. 2019. P. 183–222. S2CID 158251793. DOI: 10.1007/978-3-030-03152-7_8
12. Bressler R.D. The mortality cost of carbon // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. № 1. DOI: 10.1038/s41467-021-24487-w
13. A near-term to net zero alternative to the social cost of carbon for setting carbon prices / N. Kaufman [et al.] // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. № 11. P. 1010–1014. DOI: 10.1038/s41558-020-0880-3
14. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Комплексная методология оценки и прогнозирования экологических угроз и социально-экономического ущерба, обусловленных опасным воздействием объектов транспорта и теплоэнергетики на население Крайнего Севера // *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2019. № 1 (47). С. 8–11.
15. Kopp R.E., Mignone B.K. The U.S. Government's Social Cost of Carbon Estimates after Their First Two Years: Pathways for Improvement // *Economics*. 2012. № 6 (1). S2CID 154795768. DOI: 10.5018/economics-ejournal.ja.2012-15
16. Country-level social cost of carbon / K. Ricke [et al.] // *Nature Climate Change*. 2018. № 8. DOI: 10.1038/s41558-018-0282-y
17. Comparative analysis of carbon capture and storage finance gaps and the social cost of carbon / A.H. Steele [et al.] // *Energies*. 2021. Vol. 14. № 11. DOI: 10.3390/en14112987
18. Method for determining the basic energy characteristics of elements of a hybrid car engine / V. Rakov [et al.] // *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. № 337 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012066
19. A brief study on hybrid electric vehicles / K.G. Tulasi [et al.] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Inventive Research in Computing Applications: ICIRCA*. 2021. P. 54–59. DOI: 10.1109/ICIRCA51532.2021.9544968
20. Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles / Yu. Huang [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2019. № 659. P. 275–282. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.349

21. Mamala J., Śmieja M., Praznowski K. Analysis of the total unit energy consumption of a car with a hybrid drive system in real operating conditions // *Energies*. 2021. № 14 (13). DOI: 10.3390/en14133966
22. Kapustin A., Rakov V. Assessing safety of gas, petrol and electric vehicles // *Transportation Research Procedia*. 2018. № 36. P. 260–265. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.079
23. Modeling of Fuel Consumption of Passenger Cars Based on Their Technical Characteristics / D.B. Yefimenko [et al.] // *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings*. 2021.
24. Трофименко Ю.В., Комков В.И. Инвентаризация выбросов загрязняющих веществ передвижными источниками дорожного транспорта: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2023. 114 с.
25. Раков В.А. Методология комплексной оценки и обеспечения эффективности эксплуатации гибридных автомобилей: дис. ... д-ра техн. наук. Вологда, 2025. 422 с.
26. Kiseleva E.V., Kaminskiy N.S., Presnykov V.A. Study of Fuel Efficiency of Hybrid Vehicles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Science and Technology Conference «EarthScience»*. Russky Island: IOP Publishing. 2020. P. 022086. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022086
27. Kapustin A., Rakov V.A. Methodology to Evaluate the Impact of Hybrid Cars Engine Type on their Economic Efficiency and Environmental Safety // *International Conference on Road Organization and Safety in Big Cities*. Amsterdam: Elsevier BV. 2017. Vol. 20. P. 247–253.

References

1. Pistoia G. Electric and hybrid vehicles. power sources, models, sustainability, infrastructure and the market. Great Britain, Oxford: The Netherlands Linacre House. 2010. 645 p.
2. Trofimenko Yu.V., Komkov V.I., Donchenko V.V. Methods and results of forecasting number and structure of motor fleet in the Russian Federation by types of engine and fuel used for calculation of greenhouse gases emission till 2050 // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8. № 6. P. 2707–2711. DOI: 10.30534/ijeter/2020/79862020
3. Hybrid electric vehicle specific engines: State-of-the-art review / Yu. Wang [et al.] // *Energy Reports*. 2022. № 8. P. 832–851. DOI: 10.1016/j.egy.2021.11.265
4. Hassouna F.M.A., Al-Sahili K. Environmental impact assessment of the transportation sector and hybrid vehicle implications in Palestine // *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 19. P. 7878. DOI: 10.3390/SU12197878
5. Assessment of feasibility of using the existing electric power infrastructure for charging electric and hybrid vehicles / V. Rakov // *E3S Web of Conferences*. 2020.
6. Kapustin A., Rakov V.A. Results of assessing SO₂ emissions from e-vehicles in case of their possible switching to electricity // *Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities (SPbOTSIC 2018)*. 2018. Vol. 36. P. 266–273.
7. Rakov V.A., Zuev M.S. Analiticheskie issledovaniya vybrosov SO₂ legkovymi transportnymi sredstvami pri dvizhenii po ciklu WLTC // *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы i sredstva: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Tyumen': Tyumenskij industrial'nyj universitet*, 2020. S. 189–193.
8. Kapustin A.A., Rakov V.A. Sravnenie vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv ot avtomobilej i razlichnyh energeticheskikh ustanovok // *Transport na al'ternativnom toplive*. 2017. № 6 (60). S. 53–60.
9. Q&A: The social cost of carbon // *Carbon Brief*. 2017-02-14. Retrieved 2019-11-07.
10. Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis / P. Wang // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 209. P. 1494–1507. S2CID 158145495. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.058
11. Chen D.B., Van Der Beek J., Cloud J. Hypothesis for a Risk Cost of Carbon: Revising the Externalities and Ethics of Climate Change // *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy*. 2019. P. 183–222. S2CID 158251793. DOI: 10.1007/978-3-030-03152-7_8

12. Bressler R.D. The mortality cost of carbon // *Nature Communications*. 2021. Vol. 12. № 1. DOI: 10.1038/s41467-021-24487-w
13. A near-term to net zero alternative to the social cost of carbon for setting carbon prices / N. Kaufman [et al.] // *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. № 11. P. 1010–1014. DOI: 10.1038/s41558-020-0880-3
14. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Kompleksnaya metodologiya ocenki i prognozirovaniya ekologicheskikh ugroz i social'no-ekonomicheskogo ushcherba, obuslovlennykh opasnym vozdeystviem ob'ektov transporta i teploenergetiki na naselenie Krajnego Severa // *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa*. 2019. № 1 (47). S. 8–11.
15. Kopp R.E., Mignone B.K. The U.S. Government's Social Cost of Carbon Estimates after Their First Two Years: Pathways for Improvement // *Economics*. 2012. № 6 (1). S2CID 154795768. DOI: 10.5018/economics-ejournal.ja.2012-15
16. Country-level social cost of carbon / K. Ricke [et al.] // *Nature Climate Change*. 2018. № 8. DOI: 10.1038/s41558-018-0282-y
17. Comparative analysis of carbon capture and storage finance gaps and the social cost of carbon / A.H. Steele [et al.] // *Energies*. 2021. Vol. 14. № 11. DOI: 10.3390/en14112987
18. Method for determining the basic energy characteristics of elements of a hybrid car engine / V. Rakov [et al.] // *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. № 337 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/337/1/012066
19. A brief study on hybrid electric vehicles / K.G. Tulasi [et al.] // *Proceedings of the 3rd International Conference on Inventive Research in Computing Applications: ICIRCA*. 2021. P. 54–59. DOI: 10.1109/ICIRCA51532.2021.9544968
20. Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles / Yu. Huang [et al.] // *Science of the Total Environment*. 2019. № 659. P. 275–282. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.349
21. Mamala J., Śmieja M., Prażnowski K. Analysis of the total unit energy consumption of a car with a hybrid drive system in real operating conditions // *Energies*. 2021. № 14 (13). DOI: 10.3390/en14133966
22. Kapustin A., Rakov V. Assessing safety of gas, petrol and electric vehicles // *Transportation Research Procedia*. 2018. № 36. P. 260–265. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.079
23. Modeling of Fuel Consumption of Passenger Cars Based on Their Technical Characteristics / D.B. Yefimenko [et al.] // *Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings*. 2021.
24. Trofimenko Yu.V., Komkov V.I. Inventarizaciya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv peredvizhnymi istochnikami dorozhnogo transporta: ucheb. posobie. M.: MADI, 2023. 114 s.
25. Rakov V.A. Metodologiya kompleksnoj ocenki i obespecheniya effektivnosti ekspluatatsii gibridnyh avtomobilej: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Vologda, 2025. 422 s.
26. Kiseleva E.V., Kaminskiy N.S., Presnykov V.A. Study of Fuel Efficiency of Hybrid Vehicles // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Science and Technology Conference «EarthScience»*. Russky Island: IOP Publishing. 2020. P. 022086. DOI: 10.1088/1755-1315/459/2/022086
27. Kapustin A., Rakov V.A. Methodology to evaluate the impact of hybrid cars engine type on their economic efficiency and environmental safety // *International Conference on Road Organization and Safety in Big Cities*. Amsterdam: Elsevier BV. 2017. Vol. 20. P. 247–253.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 29.08.2025; одобрена после рецензирования: 19.01.2026;
принята к публикации: 06.02.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 29.08.2025; approved after review: 19.01.2026;
accepted for publication: 06.02.2026

Информация об авторе:

Раков Вячеслав Александрович, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15), доктор технических наук, доцент, e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4725-5839>, SPIN-код: 5146-3452

Information about the author:

Rakov Vyacheslav A., associate professor of the department of automobiles and automobile industry of Vologda state university (160000, Vologda, Lenin St., bldg. 15), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: vyacheslav.rakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4725-5839>, SPIN: 5146-3452