

Научная статья

УДК 665.733.5, 544.31

DOI: 10.15372/ChUR2025630

EDN: DBGVLF

## Исследование зависимости удельных выбросов диоксида углерода от химического состава высокооктановых компонентов автомобильных бензинов

М. Н. РАХИМОВ<sup>1</sup> , И. М. ГУБАЙДУЛЛИН<sup>1,2</sup>, Ф. Ш. ВИЛЬДАНОВ<sup>1</sup>, М. М. ЯКУПОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Институт нефтехимии и катализа УФИЦ РАН, Уфа, Россия

E-mail: [rmni@mail.ru](mailto:rmni@mail.ru) , [irekmars@mail.ru](mailto:irekmars@mail.ru), [farhad\\_ufa@mail.ru](mailto:farhad_ufa@mail.ru), [yum87@mail.ru](mailto:yum87@mail.ru)

### Аннотация

Антропогенная эмиссия парниковых газов, главным образом диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), считается одной из главных причин глобального изменения климата. Транспортный сектор – один из крупнейших эмитентов углекислого газа (на его долю приходится более 20 % от всех выбросов CO<sub>2</sub>), поэтому снижение углеродного следа от транспортных средств следует считать одним из основных направлений технологической декарбонизации. В статье показано, что выбросы CO<sub>2</sub> автомобильных бензинов существенно зависят от компонентного состава товарных бензинов. Выполнены расчеты удельных выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании высокооктановых компонентов автомобильных бензинов – риформата и изомеризата. Показано, что для риформата удельные выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т риформата и на единицу выделяемой энергии на 6.0 и 13.4 % соответственно выше таких для изомеризата. Установлено, что основной причиной больших удельных выбросов CO<sub>2</sub> для риформата является высокое содержание в нем ароматических углеводородов. При этом, в отличие от парафиновых углеводородов, при уменьшении молекулярной массы ароматических соединений наблюдается увеличение удельных выбросов CO<sub>2</sub>. Представленные результаты можно использовать при реализации перехода на низкоуглеродную модель развития транспортного сектора путем применения более экологичных видов топлива за счет модифицирования его состава. Эти подходы не требуют изменения конструкции двигателей внутреннего сгорания или внедрения новой инфраструктуры, как в случае, например, применения двигателей, работающих на чистом водороде.

**Ключевые слова:** автомобильный бензин, выбросы диоксида углерода, изомеризат, риформат, углеводородный состав

**Для цитирования:** Рахимов М. Н., Губайдуллин И. М., Вильданов Ф. Ш., Якупов М. М. Исследование зависимости удельных выбросов диоксида углерода от химического состава высокооктановых компонентов автомобильных бензинов // Химия в интересах устойчивого развития. 2025. Т. 33, № 1. С. 59–66. DOI: 10.15372/ChUR2025630. EDN: DBGVLF.

Original article

# Investigation of the dependence of specific carbon dioxide emissions on the chemical composition of high-octane components of motor gasolines

M. N. RAKHIMOV<sup>1</sup> ✉, I. M. GUBAYDULLIN<sup>1,2</sup>, F. S. VILDANOV<sup>1</sup>, M. M. YAKUPOV<sup>2</sup><sup>1</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia<sup>2</sup>Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of RAS, Ufa, Russia

E-mail: rmni@mail.ru✉, irekmars@mail.ru, farhad\_ufa@mail.ru, ymm87@mail.ru

## Abstract

The anthropogenic emission of greenhouse gases, mainly carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), is considered as one of the main causes of global climate change. The transport sector is one of the largest emitters of carbon dioxide (accounting for more than 20 % of all CO<sub>2</sub> emissions), therefore, reducing the carbon footprint of vehicles should be considered one of the main directions of technological decarbonisation. It is shown in the article that the CO<sub>2</sub> emissions of motor gasoline significantly depend on the component composition of commercial gasoline. Calculations of specific CO<sub>2</sub> emission from the combustion of high-octane components of motor gasoline, namely reformat and isomerisate, were carried out. It is shown that for reformat, the specific emission of CO<sub>2</sub> per 1 t of reformat and per unit energy released is higher by 6.0 and 13.4 %, respectively, than the values for isomerisate. It is shown that the main reason for large specific CO<sub>2</sub> emissions for reformat is the high content of aromatic hydrocarbons in it. Moreover, unlike for paraffinic hydrocarbons, the lower is the molecular weight of aromatic compounds, the higher are specific CO<sub>2</sub> emissions. The presented results can be used to implement the transition to the low-carbon model for the development of the transport sector by utilising more environmental-friendly kinds of fuel through modifying its composition. These approaches do not require changing the design of internal combustion engines or introducing new infrastructure, as in the case, for example, of using engines powered by pure hydrogen.

**Keywords:** motor gasoline, carbon dioxide emissions, isomerisate, reformat, hydrocarbon composition

## ВВЕДЕНИЕ

В начале XXI в. стало очевидно, что антропогенная эмиссия парниковых газов – одна из главных причин глобального изменения климата. Значимость этой проблемы возрастает с каждым днем и находит свое отражение в “зеленой повестке” современной мировой экономики и политического курса правительств развитых стран. Мировое сообщество предпринимает шаги для сокращения выбросов парниковых газов, сосредотачиваясь, прежде всего, на снижении выбросов диоксида углерода [1, 2].

В 2019 г. Российская Федерация присоединилась к Парижскому соглашению, направленному на существенное сокращение глобальных

выбросов парниковых газов и ограничение повышения глобальной температуры в этом столетии до 2 °С при одновременном поиске средств для еще большего ограничения этого повышения до 1.5°С [1, 3]. В ноябре 2020 г. национальный вклад нашей страны в реализацию Парижского соглашения был определен Указом Президента Российской Федерации “О сокращении выбросов парниковых газов”, постановляющим сокращение уровня выбросов до 70 % к 2030 г. относительно уровня 1990 г. [4]. Это означает, что в России началась активная разработка и внедрение собственных адаптационных мер в области охраны окружающей среды и сокращения выбросов парниковых газов [5, 6]. Дальнейшим этапом в развитии процесса декарбониза-

ции российской экономики стало принятие таких документов, как “Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года” и “Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года” [7, 8].

В настоящее время общепризнано, что диоксид углерода является одной из основных причин изменения климата за счет увеличения его эмиссии из-за повышения объема сжигания ископаемого топлива. Основные источники выбросов  $\text{CO}_2$  – энергетика, транспорт, производство, строительство [9]. Транспортный сектор считается одним из крупнейших эмитентов диоксида углерода, в 2020 г. на его долю пришлось 20.4 % от всех выбросов  $\text{CO}_2$  (7.1 млрд т), что требует незамедлительной реализации мер по декарбонизации всех видов транспорта [10].

По данным Института глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля [11], главным источником выбросов  $\text{CO}_2$  среди основных видов транспорта служит автомобильный транспорт – 183.38 млн т (85 % от всех выбросов транспорта) за 2020 г. Следовательно, снижение углеродного следа от автотранспортных средств следует считать одним из главных направлений низкоуглеродного развития отрасли [12].

Анализ мирового и отечественного опыта перехода к низкоуглеродной модели развития транспортного сектора [6, 11–13] позволяет классифицировать меры по сокращению выбросов парниковых газов, в том числе  $\text{CO}_2$ , по следующим группам [14–17]:

1) повышение энергетической эффективности автотранспортных технологий, основанных на использовании традиционных нефтепродуктов (автобензин, дизельное топливо, газомоторное топливо), в том числе:

- использование топливных компонентов и присадок, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность топлива в сочетании с низкой экологической нагрузкой;

- разработка оборудования для максимально эффективного использования топлива, например, более экономичных двигателей, устройств для дожигания и ликвидации отработанных газов;

2) использование в транспортных средствах альтернативных источников энергии с наименьшими выбросами парниковых газов, в том числе:

- водородное топливо;
- альтернативные моторные топлива на основе возобновляемого биосырья;

- использование электромобилей, гибридных видов автотранспорта;

3) сокращение нерационального и необоснованного перемещения грузов и пассажиров, использование расширенных возможностей коммуникации между людьми, транспортными средствами и дорожной инфраструктурой.

При этом большинство основных, инновационных методов снижения выбросов диоксида углерода в секторе автомобильного транспорта включают существенный недостаток – высокую стоимость инфраструктуры для реализации данных проектов [18].

С момента появления первых двигателей внутреннего сгорания и до настоящего времени в России основными видами топлива для автотранспорта остаются продукты переработки нефти – бензины (~42 %), дизельные топлива (~50 %), сжиженные нефтяные газы (~6 %) и прочие (~2 %) [19].

Анализ сценариев развития и потребления традиционных моторных топлив для автотранспорта, учитывающих тренды и “Стратегию социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов Российской Федерации до 2050 года” [7], показывает, что даже с учетом разработки масштабных планов по сокращению использования традиционных автомобильных топлив потребление их в ближайшие десятилетия все равно останется высоким, и транспортный сектор будет одним из основных источников выбросов  $\text{CO}_2$  [12].

В качестве критерия оценки выбросов диоксида углерода при сжигании топлива используют коэффициенты выбросов  $\text{CO}_2$ , которые показывают, сколько килограммов  $\text{CO}_2$  поступает в атмосферу при сжигании 1 кг того или иного вида топлива или на единицу получаемой при этом энергии. Для автомобильных бензинов и дизельных топлив, например, коэффициенты составляют 3.03 и 3.15 кг  $\text{CO}_2$ /кг или 69 300 и 74 100 кг/ТДж соответственно [20]. При расчетах выбросов  $\text{CO}_2$  для данных видов топлив вводится поправка, учитывающая значения плотности различных марок топлив. В литературе практически отсутствуют данные о зависимости удельных выбросов от химического состава топлива, что и обуславливает актуальность данного исследования.

Цель настоящего исследования – сопоставительная оценка удельных выбросов  $\text{CO}_2$  таких распространенных высокооктановых компонентов автомобильных бензинов, как риформат и изомеризат, путем исследования углеводород-

ного состава последних, расчетов теплотворной способности и удельных выбросов  $\text{CO}_2$  входящих в состав топлив углеводородов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования на промышленных установках нефтеперерабатывающих заводов г. Уфы (Республика Башкортостан) были отобраны пробы высокооктановых компонентов автомобильных бензинов – риформата и изомеризата, физико-химические свойства которых представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

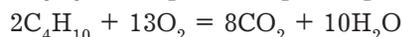
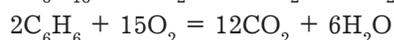
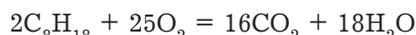
Углеводородный состав риформата определяли по данным газохроматографического анализа с помощью хроматографа GC 2010 Plus (Shimadzu, Япония) с капиллярной колонкой, состав изомеризата – методом газожидкостной хроматографии с использованием хроматографа “Кристалл 5000” (Хроматэк, Россия).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### Аналитическое исследование

Коэффициенты выбросов  $\text{CO}_2$  топлива или его компонентов можно определить стехиометрически по известному химическому составу из условий реакции полного окисления. Проведенные расчеты показывают, что, например, для октана, бензола и бутана (*n*- и *изо*-) коэффициенты выбросов составляют 3.09, 3.39 и

3.03 кг  $\text{CO}_2$ /кг соответственно и вычисляются согласно уравнениям реакций:



По нашим расчетам, такие широко распространенные углеводородные компоненты автомобильных бензинов, как бутан (*n*- и *изо*-) и толуол, по удельным выбросам  $\text{CO}_2$  отличаются друг от друга на 10.6 % (3.03 и 3.35 кг  $\text{CO}_2$ /кг соответственно).

Согласно современным стандартам, в составе автомобильных бензинов помимо углеводородов в значительных количествах могут присутствовать высокооктановые кислородсодержащие компоненты (оксигенаты), максимально допустимое содержание которых составляет не более 2.7 мас. % в пересчете на кислород. Среди последних наибольшее распространение получили метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ) и этанол. Расчеты показывают, что коэффициент выбросов  $\text{CO}_2$  для МТБЭ и этанола составляют 2.50 и 1.91 кг  $\text{CO}_2$ /кг соответственно, что значительно меньше таковых для входящих в состав топлив углеводородов.

В табл. 3 приведены удельные выбросы  $\text{CO}_2$  при сжигании некоторых углеводородов и наиболее распространенных оксигенатов автомобильных бензинов.

Компоненты автомобильных бензинов существенно различаются по коэффициентам выбросов  $\text{CO}_2$  (см. табл. 1). Среди углеводородов

ТАБЛИЦА 1

Основные физико-химические свойства пробы стабильного риформата

Показатель	Ед. изм.	Значение
Октановое число:		
исследовательский метод	–	96.7
моторный метод	–	85.5
Температура начала кипения (НК)	°С	36.0
Температура перегонки для фракционного состава риформата:		
10 об. % бензина	°С	88.0
50 об. % бензина	°С	118.0
90 об. % бензина	°С	156.0
98 об. % бензина	°С	171.0
Температура конца кипения (КК)	°С	188.0
Плотность:		
при 15 °С	кг/м <sup>3</sup>	804.0
при 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	802.0
Давление насыщенных паров	кПа	23.6

ТАБЛИЦА 2

Основные физико-химические свойства пробы изомеризата

Показатель	Ед. изм.	Значение
Октановое число:		
исследовательский метод	–	76.9
моторный метод	–	74.8
Температура начала кипения (НК)	°С	36.0
Температура конца кипения (КК)	°С	64.0
Плотность:		
при 15 °С	кг/м <sup>3</sup>	659.8
при 20 °С	кг/м <sup>3</sup>	654.8
Давление насыщенных паров	кПа	95.9

ТАБЛИЦА 3

Удельные выбросы  $\text{CO}_2$  при сжигании некоторых углеводородов и кислородсодержащих высокооктановых компонентов автомобильных бензинов

Компонент	Формула	Коэффициент выбросов	
		По массе компонента, кг $\text{CO}_2$ /кг	По теплотворной способности компонента, кг/ТДж
<b>Парафины</b>			
Бутан ( <i>n</i> -, <i>изо</i> -)	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	3.03	65927
Пентан ( <i>n</i> -, <i>изо</i> -)	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	3.06	67654
Гексан ( <i>n</i> -, <i>изо</i> -)	$\text{C}_6\text{H}_{14}$	3.07	68177
Гептан ( <i>n</i> -, <i>изо</i> -)	$\text{C}_7\text{H}_{16}$	3.08	68643
Октан ( <i>n</i> -, <i>изо</i> -)	$\text{C}_8\text{H}_{18}$	3.09	69035
<b>Нафтены</b>			
Циклопентан	$\text{C}_5\text{H}_{10}$	3.14	71903
Циклогексан	$\text{C}_6\text{H}_{12}$	3.14	71903
Циклогептан	$\text{C}_7\text{H}_{14}$	3.14	71903
<b>Ароматические углеводороды</b>			
Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6$	3.39	84017
Толуол	$\text{C}_7\text{H}_8$	3.35	82168
Ксилол ( <i>m</i> -, <i>o</i> -, <i>p</i> -)	$\text{C}_8\text{H}_{10}$	3.32	80583
<b>Оксигенаты</b>			
Метил- <i>трет</i> -бутиловый эфир	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$	2.50	76923
Этанол	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	1.91	63672

максимальное значение коэффициента выбросов на единицу массы у бензола (3.39 кг  $\text{CO}_2$ /кг), минимальное – у *n*- и *изо*-бутана (3.03 кг  $\text{CO}_2$ /кг), т. е. удельные выбросы  $\text{CO}_2$  для бензола на 11.9 % выше по сравнению с бутаном, а по значению коэффициента выброса  $\text{CO}_2$  на единицу получаемой энергии (теплоты) превышение составляет 27.5 %. Следует отметить, что минимальное значение коэффициента выброса  $\text{CO}_2$  для оксигенатов, например для этанола, составляет 1.91 кг  $\text{CO}_2$ /кг, что на 77.2 % меньше соответствующего показателя для бензола.

Одной из основных причин, ограничивающих содержание в бензинах оксигенатов, является их низкая теплотворная способность. Поэтому более корректно сравнивать компоненты топлив по количеству выбросов  $\text{CO}_2$  относительно их теплотворной способности. Низшая теплотворная способность составляет: для бензола – 40.23 МДж/кг, для этанола – 30.00 МДж/кг. Расчеты показывают, что коэффициенты выброса  $\text{CO}_2$  на единицу энергии для этих углеводородов равны 84017 и 63672 кг/ТДж соответственно, т. е. различаются на 32.0 %.

Анализ литературных данных показывает, что абсолютные значения теплотворной способности товарных топлив существенно разнятся. В частности, значение данного показателя для

автомобильных бензинов по разным источникам колеблется в диапазоне 41–46 МДж/кг, т. е. величины различаются более чем на 12.2 %. Примерно такая же картина характерна и для других видов топлив. Одной из причин этого, на наш взгляд, является разнородный компонентный состав товарных топлив. Так, автомобильные бензины получают путем компаундирования высокооктановых компонентов таких процессов переработки нефти, как риформинг бензиновых фракций, каталитический крекинг нефтяных остатков, изомеризация легких бензиновых фракций, алкилирование изобутана олефинами и др. В состав товарных бензинов входят ароматические, парафиновые, нафтеновые, олефиновые углеводороды и иногда кислородсодержащие соединения [21, 22].

Основным высокооктановым компонентом современных автомобильных бензинов для большинства стран является риформат – продукт химических превращений фракции прямогонных бензинов. В общем балансе автомобильных бензинов США доля риформата составляет порядка 33 %, в странах Европейского союза – 48 %, а в России – 54 % [23].

В процесс риформинга, как правило, вовлекается тяжелая часть бензиновых фракций (85–185 °С), повышение октанового числа в этом

ТАБЛИЦА 4

Углеводородный состав, теплотворная способность и выбросы диоксида углерода компонентов риформата

Компонент	Содержание, мас. %	Теплотворная способность, МДж/кг	Количество теплоты, 10 <sup>2</sup> МДж	Коэффициент выбросов*		Удельные выбросы**	
				кг СО <sub>2</sub> /кг	кг/ТДж	кг СО <sub>2</sub> /кг	кг/ТДж
<b>Парафины</b>							
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.15	45.96	6.89	3.03	65927	0.0045	98.9
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	2.63	45.23	118.95	3.06	67654	0.0805	1779.3
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	6.49	45.03	292.24	3.07	68177	0.1992	4424.7
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	12.53	44.87	562.22	3.08	68643	0.3859	8600.9
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	4.86	44.76	217.53	3.09	69035	0.1502	3355.1
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	1.26	44.65	56.26	3.09	69205	0.0389	872.0
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0.24	44.60	10.70	3.10	69507	0.0074	166.8
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	0.03	44.24	1.33	3.10	70072	0.0009	21.0
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	0.04	44.12	1.76	3.11	70490	0.0012	28.2
<b>Олефины</b>							
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0.01	43.67	0.44	3.14	71903	0.0003	7.2
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	0.05	43.67	2.18	3.14	71903	0.0016	36.0
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0.13	43.67	5.68	3.14	71903	0.0041	93.5
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	0.38	43.67	16.59	3.14	71903	0.0119	273.2
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	0.07	43.67	3.06	3.14	71903	0.0022	50.3
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	0.02	43.67	0.87	3.14	71903	0.0006	14.4
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	0.01	43.67	0.44	3.14	71903	0.0003	7.2
<b>Нафтены</b>							
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	0.06	43.67	2.62	3.14	71903	0.0019	43.1
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0.86	43.67	37.56	3.14	71903	0.0270	618.4
C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	0.41	43.67	17.90	3.14	71903	0.0129	294.8
C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>	0.65	43.67	28.39	3.14	71903	0.0204	467.4
C <sub>9</sub> H <sub>18</sub>	0.11	43.67	4.80	3.14	71903	0.0035	79.1
C <sub>10</sub> H <sub>20</sub>	0.10	43.67	4.37	3.14	71903	0.0031	71.9
C <sub>11</sub> H <sub>22</sub>	0.22	43.67	9.61	3.14	71903	0.0069	158.2
<b>Ароматические углеводороды</b>							
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	7.46	40.23	300.12	3.38	84017	0.2521	6267.7
C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	19.61	40.77	799.50	3.35	82168	0.6569	16113.2
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	20.63	41.20	849.96	3.32	80583	0.6849	16624.2
C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	15.38	41.45	637.50	3.30	79614	0.5075	12244.6
C <sub>10</sub> H <sub>14</sub>	4.95	41.71	206.46	3.28	78638	0.1624	3892.6
C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	0.47	41.86	19.67	3.27	78118	0.0154	367.2
C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	0.18	42.01	7.56	3.26	77601	0.0059	139.7
C <sub>13</sub> H <sub>20</sub>	0.01	42.27	0.42	3.25	76887	0.0003	7.7
<b>Сумма</b>	<b>100.00</b>	<b>–</b>	<b>4223.60</b>	<b>–</b>	<b>–</b>	<b>3.2511</b>	<b>77218.3</b>

Примечание. Здесь и в табл. 5: прочерк – нет данных.

\* Коэффициент выбросов СО<sub>2</sub> при сжигании топлива (здесь и в табл. 5):

кг СО<sub>2</sub>/кг – количество СО<sub>2</sub> (кг), которое образуется при сжигании 1 кг топлива (углеводорода);

кг/ТДж – количество СО<sub>2</sub> (кг), которое приходится на единицу выделяющегося тепла при сжигании топлива (углеводорода).

\*\* Удельные выбросы (здесь и в табл. 5):

кг СО<sub>2</sub>/кг – количество СО<sub>2</sub> (кг), которое образуется при сжигании данного углеводорода (кг) в смеси;

кг/ТДж – количество СО<sub>2</sub> (кг) в расчете на выделяющееся количества тепла при сжигании данного углеводорода в смеси.

случае достигается за счет образования в риформате ароматических соединений. Основным промышленным процессом, позволяющим по-

высить октановое число легкой части бензинов (фракция, выкипающая от температуры НК до 85 °С, где НК – начало кипения), считается про-

цесс изомеризации, в ходе которого основные классы углеводородов превращаются в изопарафины (изомеризаты).

### Расчеты

Теплотворная способность каждого компонента и количество теплоты в смеси были рассчитаны согласно формуле [22]:

$$\Delta_c H^{B,H}(C_n H_m) = [M_C * \Delta_c H^{B,H}(C) + M_H * \Delta_c H^{B,H}(H)]$$

где  $\Delta_c H^{B,H}(C_n H_m)$  – изменение высшей и низшей массовых теплот сгорания углеводорода, МДж/кг;  $n$  и  $m$  – число атомов углерода и водорода в молекулах соответственно;  $M_C$  и  $M_H$  – массы соответствующих атомов в 1 кг (г) углеводорода, т. е.  $M_C + M_H = 1$  кг (г);  $\Delta_c H^{B,H}(C)$  и  $\Delta_c H^{B,H}(H)$  – доли изменения теплот сгорания, приходящиеся на атомы углерода и водорода соответственно.

Удельные выбросы  $CO_2$  рассчитаны стехиометрически для реакции полного окисления индивидуальных углеводородов в составе исследуемых компонентов бензинов.

Полученные результаты для риформата приведены в табл. 4, для изомеризата – в табл. 5.

Согласно результатам расчетов (см. табл. 4 и 5), суммарный массовый коэффициент выбросов  $CO_2$  для риформата равен 3.25 кг  $CO_2$ /кг, а для изомеризата – 3.07 кг  $CO_2$ /кг. Следовательно, при сжигании 1 т изомеризата удельные выбросы  $CO_2$  в атмосферу на 6.03 % ниже, чем у риформата. Расчеты также показывают, что коэффициент выбросов на единицу получаемой при этом энергии для риформата превышает таковой для изомеризата на 13.2 %. Основной причиной больших удельных выбросов  $CO_2$  для риформата является высокое содержание в нем ароматических углеводородов, суммарное со-

держание которых составляет ~70 %, а также низкая их теплотворная способность. Причем в отличие от парафиновых углеводородов, чем меньше молекулярная масса ароматического углеводорода, тем выше удельные выбросы  $CO_2$ . Изомеризат в отличие от риформата более чем на 97 % состоит из парафиновых углеводородов, и в нем преобладают парафины с меньшей молекулярной массой и соответственно более низкими выбросами диоксида углерода. Высокое содержание ароматических углеводородов в составе риформата является основной причиной высокой эмиссии диоксида углерода.

На основании полученных результатов можно предположить, что частичная или полная замена риформата на изомеризат в автомобильном бензине позволит снизить антропогенную нагрузку от использования автомобильного транспорта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что удельные выбросы диоксида углерода автомобильных бензинов существенно зависят от их компонентного состава.

Показано, что удельные выбросы диоксида углерода от 1 т изомеризата примерно на 6 % меньше, чем таковые для риформата, а при расчетах удельных выбросов на единицу образующейся энергии – ниже более чем на 13 %. Основной причиной высоких удельных выбросов риформата является преобладающее содержание в нем ароматических углеводородов. Причем, в отличие от парафиновых углеводородов, чем меньше молекулярная масса ароматического углеводорода, тем выше удельные выбросы  $CO_2$ .

ТАБЛИЦА 5

Углеводородный состав, теплотворная способность и выбросы диоксида углерода компонентов изомеризата

Компонент	Содержание, мас. %	Теплотворная способность, кДж/кг	Количество теплоты, $10^2$ МДж	Коэффициент выбросов		Удельные выбросы	
				кг $CO_2$ /кг	кг/ТДж	кг $CO_2$ /кг	кг/ТДж
<b>Парафины</b>							
$C_4H_{10}$	1.34	45.96	61.59	3.03	65927	0.0406	883,4
$C_5H_{12}$	48.02	45.23	2171.94	3.06	67654	1.4694	32487.6
$C_6H_{14}$	48.27	45.03	2173.60	3.07	68177	1.4819	32908.9
<b>Нафтены</b>							
$C_5H_{10}$	2.35	43.67	102.62	3.14	71903	0.0738	1689.7
$C_6H_{12}$	0.02	43.67	0.87	3.14	71903	0.0006	14.4
<b>Сумма</b>	100.00	–	4510.63	–	–	3.0663	67984.0

Примечание. Обозн. см. табл. 4.

Представленные результаты можно использовать при реализации одного из наиболее доступных вариантов перехода на низкоуглеродную модель развития транспортного сектора путем применения более экологичных видов топлива за счет модифицирования его состава. Эти подходы не требуют изменения конструкции двигателей внутреннего сгорания или внедрения новой инфраструктуры, как в случае, например, применения двигателей, работающих на чистом водороде.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Грушевенко Е., Капитонов С., Мельников Ю., Пердеро А., Шевелева Н., Сигиневич Д. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России / *SKolkovo Moscow School of Management*. Сколково, 2021. 158 с. URL: [https://energyskolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Decarbonization\\_of\\_oil\\_and\\_gas\\_RU\\_22032021.pdf](https://energyskolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf) (дата обращения: 01.11.2024).
2. ЕСЕ/TRANS/2023/21. Смягчение последствий изменения климата в сфере внутреннего транспорта на переломном этапе: последующие действия / Организация Объединенных Наций. Экономический и Социальный Совет. Европейская экономическая комиссия. Комитет по внутреннему транспорту, 85-я сессия, Женева, 21–24 февр. 2023 г. Женева, 2023. 48 с.
3. Парижское соглашение / Организация Объединенных Наций. URL: [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/russian\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/russian_paris_agreement.pdf) (дата обращения: 01.11.2024).
4. О сокращении выбросов парниковых газов: Указ Президента РФ от 04 нояб. 2020 г. № 666. Доступ из информ.-прав. портала «ГАРАНТ.РУ». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74756623/?ysclid=m1zxtui625107768997> (дата обращения: 01.11.2024).
5. О принятии Парижского соглашения: Постановление Правительства РФ от 21 сент. 2019 г. № 1228. Доступ из информ.-прав. портала «ГАРАНТ.РУ». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72661694/?ysclid=m1zygv7iru868009182> (дата обращения: 01.11.2024).
6. Редникова Т. В. Меры адаптации к климатическим изменениям: совершенствование экологического законодательства Российской Федерации в свете присоединения к Парижскому соглашению по климату // *Союз криминалистов и криминологов*. 2020. № 4. С. 122–127.
7. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: утв. Распоряжением Правительства РФ от 29 окт. 2021 г. № 3052-р. Доступ из электрон. фонда правовых и нормативно-техн. док. «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/726639341?ysclid=m20a82ryzx431914924> (дата обращения: 01.11.2024).
8. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утв. Распоряжением Правительства РФ от 27 нояб. 2021 г. № 3363-р. Доступ из электрон. фонда правовых и нормативно-техн. док. «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/727294161?ysclid=m20aga6ccm787174531> (дата обращения: 01.11.2024).
9. Плотникова И. Н., Володин С. А., Кочнева Ю. Ю., Салыхова А. Р. Актуальные вопросы декарбонизации: метод разработки. Ч. 1. Казань: Изд-во «ФЭН» Акад. наук Респ. Татарстан, 2021. 56 с.
10. Greenhouse gas emissions by sectors, World URL: <https://ourworldindata.org/grapher/ghg-emissions-by-sector> (accessed: 01.11.2024).
11. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом / Институт глобального климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53434805> (дата обращения: 01.11.2024).
12. Аликберова Т. Т., Белик И. С., Стародубец Н. В. Адаптация транспортного сектора к процессам декарбонизации в России // *Междунар. науч.-исслед. журн.* 2023. № 8 (134). Ст. 142.
13. Трофименко Ю., Комков В., Пашина Е., Деянов Д., Гайда И., Грушевенко Е., Пердеро А. Научно обоснованный прогноз адаптаций сектора автомобильного транспорта к вероятным последствиям изменения климата и возможные сценарии его декарбонизации в Российской Федерации / *SKOLKOVO Moscow School of Management*. Сколково, 2022. 134 с. URL: [https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/51d/fij7e385h3mi8eur6dgd5si1hbolq9aeq/SKOLKOVO\\_EneC\\_RU\\_Transport.pdf](https://esg-library.mgimo.ru/upload/iblock/51d/fij7e385h3mi8eur6dgd5si1hbolq9aeq/SKOLKOVO_EneC_RU_Transport.pdf) (дата обращения: 01.11.2024).
14. Bozbas K. Biodiesel as an alternative motor fuel: production and policies in the European Union // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2008. Vol. 12, No. 2. P. 542–552.
15. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (accessed: 01.11.2024).
16. Manoharan Y., Hosseini S. E., Butler B., Alzhahrani H., Senior B. T. F., Ashuri T., Krohn J. Hydrogen fuel cell vehicles; Current status and future prospect // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, No. 11. Art. 2296.
17. Hosseini S. E., Butler B. An overview of development and challenges in hydrogen powered vehicles // *Int. J. Green Energy.* 2020. Vol. 17, No. 1. P. 13–37.
18. Куданова А. И., Яковлева Е. Ю. Экологизация автомобильного транспорта: преимущества и сложности перехода на альтернативные автомобили // *Вестн. Московского ун-та. Сер. 6. Экономика.* 2021. № 2. С. 176–198.
19. Рынок КПП: мировой опыт развития и уроки для России. URL: [https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/ru\\_ru/topics/oil-and-gas/ey-cng-market-world-development-experience-and-lessons-for-russia.pdf](https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/ru_ru/topics/oil-and-gas/ey-cng-market-world-development-experience-and-lessons-for-russia.pdf) (дата обращения: 01.11.2024).
20. Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов: приказ Минприроды России от 27 мая 2022 г. № 371. Доступ из электрон. фонда правовых и нормативно-техн. док. «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/350962750?ysclid=m22pii42pb389501774> (дата обращения: 01.11.2024).
21. Капустин В. М. Технология производства автомобильных бензинов. М.: Химия : РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2015. 254 с.
22. Рахимов М. Н., Вильданов Ф. Ш., Фаррахов С. В., Якупов М. М. Анализ теплотворной способности высокооктановых компонентов автомобильных бензинов // *Башкирский хим. журн.* 2023. Т. 30, № 3. С. 91–96.
23. Ахмадова Х. Х., Магомадова М. Х., Ахмадова А. Р. Алкилат – основной компонент высокооктановых бензинов // *Вестн. ГНТУ. Техн. науки.* 2019. Т. 15, № 4 (18). С. 49–59.

Поступила в редакцию 01.02.2024

Одобрена после рецензирования 31.05.2024

Принята к публикации 12.07.2024