



Влияние катализаторов горения топлива на технико-экономические и экологические показатели работы двигателей внутреннего сгорания горных транспортных машин

Ю.Н. Кацуба¹✉, А.А. Макаров², Л.В. Григорьева¹, Е.В. Жужнев¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Научно-производственное предприятие «Инновационный экспресс», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ rectorat@spmi.ru

Резюме: В статье представлен комплексный подход к изучению воздействия катализаторов горения. В условиях ужесточения экологических требований к горной транспортной технике и необходимости повышения топливной эффективности поиск доступных и действенных способов оптимизации рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания является крайне важной задачей. Представленное исследование фокусируется на решении этой проблемы не за счет дорогостоящей модернизации производства топлива, а путем применения малых добавок катализаторов, что делает предложенный подход экономически привлекательным. Авторы провели экспериментальные исследования по подбору состава и оценке эффективности применения катализаторов горения моторного топлива, а также определению их влияния на технико-экономические и экологические показатели работы дизельного двигателя горных транспортных машин. Основное внимание уделено влиянию новых составов каталитической системы активации топлива «Ормекс» на полноту сгорания топливовоздушной смеси, снижение дымности и помутнения отработавших газов, а также на сокращение часового расхода топлива. Для проведения экспериментальных исследований была разработана и реализована методика стендовых испытаний с применением методов математической статистики, что обеспечивает высокую достоверность полученных результатов. Ключевым новшеством является исследование влияния компонентного состава каталитической системы: соотношения фуллеридов щелочных металлов и карбоновых кислот. В результате испытаний дизельного двигателя горной транспортной машины, работающего на моторном топливе с введенным катализатором горения, дымность отработавших газов снизилась на 29,1%, помутнение – на 12,7%, часовой расход топлива – на 14,3%. Полученные результаты подтверждают эффективность применения катализаторов.

Ключевые слова: катализаторы горения, моторное топливо, двигатели внутреннего сгорания, металл-катализатор, присадки, каталитическая система активации топлива, дымность отработавших газов

Для цитирования: Кацуба Ю.Н., Макаров А.А., Григорьева Л.В., Жужнев Е.В. Влияние катализаторов горения топлива на технико-экономические и экологические показатели работы двигателей внутреннего сгорания горных транспортных машин. *Горная промышленность*. 2026;(4S):26–32. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-26-32>

Effects of fuel combustion catalysts on technical, economic, and environmental performance of internal combustion engines of mining haulage machines

Yu.N. Katsuba¹✉, A.A. Makarov², L.V. Grigoreva¹, E.V. Zhuzhnev¹

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Scientific and Production Enterprise “Innovational Express”, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ rectorat@spmi.ru

Abstract: The work presents a comprehensive approach to studying the effects of combustion catalysts. Searching for affordable and efficient ways to optimize operation of internal combustion engines is an extremely important task in conditions of constantly increasing environmental requirements for mining haulage machines, as well as the need to improve their fuel efficiency. The presented study focuses on solving this problem not through expensive fuel production upgrades, but by using small catalyst additives, which makes this approach economically attractive. The authors performed experimental studies to determine the optimal composition and evaluate the efficiency of the fuel combustion catalysts, as well as to assess their impact on the technical, economic, and environmental performance of diesel engines in haulage machines. The main focus was on studying the effect of new compositions of the Ormex catalytic fuel activation system on completeness of the air-fuel mixture combustion, a reduction in smoke and opacity of exhaust gases, as well as on reducing the fuel consumption per hour. A bench test methodology was



developed and implemented using mathematical statistics to conduct experimental studies that would ensure high reliability of the results. A key innovation is studying the effects of not only the catalytic system itself, but also its component composition, particularly the share of alkali metal fullerenes and carboxylic acids. As the result of testing a diesel engine of a haulage machine running on motor fuel with the introduced combustion catalyst, the exhaust gas smoke decreased by 29.1%, while the exhaust opacity was reduced by 12.7%, and the fuel consumption per hour was cut down by 14.3%. The results obtained confirm the efficiency of using combustion catalysts on mining haulage machines.

Keywords: combustion catalysts, motor fuel, internal combustion engines, metal catalyst, additives, catalytic fuel activation system, exhaust gas smoke

For citation: Katsuba Yu.N., Makarov A.A., Grigoreva L.V., Zhuzhnev E.V. Effects of fuel combustion catalysts on technical, economic, and environmental performance of internal combustion engines of mining haulage machines. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):26–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-26-32>

Введение

В любом моторном топливе, каким бы качественным оно не было, присутствуют несгораемые или трудносгораемые компоненты, что приводит к увеличению токсичных выбросов в отработавших газах (ОГ) и усиливает процесс коксования внутри двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Производство экологически чистых высокооктановых бензинов, требующее внедрения дорогостоящих процессов, на данный момент затруднено. При этих процессах необходимо дополнительно извлекать бензол и снижать жёсткость риформинга, что приводит к снижению октанового потенциала [1].

Однако иногда одного и того же результата можно достичь меньшими усилиями – не меняя состав топлива, а заставляя топливо сгорать более полно, при более низких температурах и с меньшими выбросами вредных веществ с ОГ. Для этих целей применяются различные присадки [2; 3], влияющие на те или иные химические процессы, происходящие в камере сгорания двигателя. Наибольший интерес на данный момент представляют катализаторы (модификаторы) горения моторного топлива [4; 5]. Введение таких добавок в топливо рассматривается как сравнительно быстрый способ улучшения его качества без значительных капитальных вложений в модернизацию производства [6–8]. Катализаторы способствуют активации молекул топлива и кислорода, снижая энергию активации ключевых химических реакций, что приводит к более раннему и полному воспламенению топливной смеси [9].

Важным эффектом является уменьшение минимальной температуры воспламенения топлива в присутствии катализатора. Благодаря этому топливо начинает гореть при более низких температурах, что оптимизирует использование энергии и снижает количество нагарообразований. Посредством изменения процесса сгорания катализаторы влияют на тепловой баланс двигателя, что сопровождается снижением тепловых потерь и повышением коэффициента полезного действия. Это проявляется в улучшении топливной экономичности без ухудшения динамических характеристик ДВС [10]. Поскольку сегодня на территории РФ прямое использование металлов в составе присадок запрещено [11], производители для этих целей применяют ионы металлов-катализаторов. Принято считать, что эффективность действия добавки зависит не только от ее состава, но и от состава базового топлива, а также от конструкции двигателя¹.

На данный момент существует порядка 10 различных теорий, описывающих сам каталитический процесс, и

ученые до сих пор не пришли к единому мнению [12–14]. Наиболее убедительными являются мультиплетная теория катализа академика А.А. Баландина и теория ансамблей профессора Н.И. Кобозева [15–18]. Исследования, проводимые как в России [19; 20], так и за рубежом [21–23], подтверждают эффективность действия катализаторов горения топлив. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что улучшение процесса горения приводит к снижению токсичности и дымности ОГ, а также к уменьшению образования полициклических ароматических углеводородов в процессе работы двигателя [24–26]. В проведенных исследованиях также отмечается снижение удельного расхода топлива и эксплуатационных потерь, улучшение антинагарных характеристик [27; 28]. На данный момент требует подтверждения отсутствие негативного влияния катализаторов на надежность ДВС [29; 30] и отсутствие опасных выбросов самого металла или его соединений в ОГ, так как предельно допустимая концентрация вредных выбросов строго регламентируется при проведении горных работ [31–33].

Настоящая статья рассматривает исследования воздействия каталитической системы активации топлива (КСАТ) «Ормекс» разработки ООО НПП «Иннэкс» на характеристики дизельных ДВС горных транспортных машин. Данный катализатор горения топлива обладает дополнительным рядом свойств: формирует эпитаксиальный защитный слой в топливной системе и в камере сгорания, оптимизирует процесс горения (глубокое окисление), подготавливает топливо к сгоранию, начиная с топливного бака. Применение топлива с КСАТ повышает надежность системы выпуска ОГ, сажевого фильтра и нейтрализатора ОГ. Катализаторы горения применяются в концентрации 10–50 ppm, при этом содержит 1% (1–5 миллиардных долей) активного металла.

Материалы и методы

Стендовые испытания на дизельном двигателе типа D-4D проводились на лабораторной базе Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Целью проведения испытаний являлось сравнительное исследование эффективности и особенностей работы дизельного двигателя при использовании топлива с катализатором в сопоставлении с базовым топливом. Результаты проведенного экспериментального исследования предполагается применить для оптимизации технологии изготовления и применения КСАТ. Для проведения исследования предприятием ООО «Иннэкс» было предоставлено три образца катализаторов горения, различающихся процентным соотношением компонентов в составе:

1. Образец 1 КСАТ «Ормекс» (желтый) – 30% карбоновых кислот и 10% фуллеридов щелочных металлов.

¹ ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту» (с изм. на 24 ноября 2023 г.).



2. Образец 2 КСАТ «Ормекс» (белый) – 20% карбоновых кислот и 20% фуллеридов щелочных металлов.

3. Образец 3 КСАТ «Ормекс» (красный) – 10% карбоновых кислот и 30% фуллеридов щелочных металлов.

Известно, что наибольшее влияние на эффективность действия добавки оказывает активный металл-катализатор. В КСАТ «Ормекс» данным компонентом является дорогостоящий платиноид, снижающий энергетический барьер активации химических реакций и температуру воспламенения смеси. Однако эффективность действия катализатора можно повысить и с помощью других компонентов. В данном эксперименте исследовались образцы, отличающиеся долей содержания фуллеридов щелочных металлов и карбоновых кислот. Действие катализаторов горения моторного топлива на показатели работы ДВС исследовалось в сопоставлении с базовым топливом, а также исследовалось их влияние на эффективность действия в составе катализаторов доли таких компонентов, как фуллериды щелочных металлов и карбоновые кислоты.

В рамках исследования эффективности действия катализаторов горения было принято решение измерить часовой расход топлива, дымность и помутнение ОГ при работе дизельного двигателя на базовом топливе и на трех образцах топлива, содержащих разные по составу катализаторы. Так как дымность характеризует количество несгоревших частиц в ОГ, по изменению данного показателя можно наглядно отследить действие добавки. Катализаторы были введены в топливо за сутки до проведения опыта.

Была составлена следующая методика испытаний:

1. Снятие базовых экологических характеристик двигателя Toyota D-4D (дымность, помутнение) при $n = 1500, 2000, 2500, 3000 \text{ мин}^{-1}$ (по пять измерений на каждой частоте вращения) и определение часового расхода топлива при работе на дизельном топливе «Лукойл».

2. Подготовка образцов дизельного топлива, содержащего КСАТ в оптимальной концентрации.

3. Заправка топливом с КСАТ и наработка в фиксированном режиме ($n = 1200 \text{ мин}^{-1}$) в течение 10 мин.

4. Снятие характеристик двигателя при работе на топливе, содержащем КСАТ по программе п. 1.

5. Обработка результатов испытаний, анализ результатов испытаний.

В каждом опыте проводилось по 5 измерений дымности и помутнения ОГ при разной частоте вращения коленчатого вала ДВС с помощью дымомера МАНА MDO2-LON. Также для каждого из образцов был зафиксирован часовой расход топлива.

Результаты и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 1–4.

Для оценки результатов был проведен двухфакторный дисперсионный анализ [34; 35] для повторных наблюдений (табл. 5–7). Цель дисперсионного анализа – определить, оказывают ли факторы и их взаимодействие статистически значимое влияние на результат. В данном эксперименте присутствуют два фактора влияния:

– фактор А – вид топлива (4 уровня: базовое топливо, образец 1, образец 2, образец 3);

– фактор В – частота вращения коленчатого вала (4 уровня: 1500, 2000, 2500, 3000 мин^{-1}).

Коэффициенты детерминации для дымности ОГ:

– для фактора А – $\eta^2_A = 0,213$ (21,3% дисперсии объясняется типом топлива);

Таблица 1
Результаты измерений характеристик двигателя внутреннего сгорания при работе на базовом топливе

$n, \text{мин}^{-1}$	1	2	3	4	5	Среднее
Дымность, m^{-1}						
1500	0,19	0,1	0,19	0,2	0,2	0,176
2000	0,21	0,29	0,26	0,2	0,3	0,252
2500	0,18	0,17	0,15	0,19	0,24	0,186
3000	0,26	0,25	0,2	0,19	0,3	0,24
Помутнение, %						
1500	9	7	7	9	8	8,0
2000	9	6	7	9	8	7,8
2500	8	8	7	9	9	8,2
3000	9	9	8	9	12	9,4
Часовой расход топлива – 0,98 л/ч						

Table 1
Results of measuring characteristics of the engine running on the conventional fuel

Таблица 2
Результаты измерений характеристик двигателя внутреннего сгорания при работе на топливе с добавлением КСАТ образца 1

$n, \text{мин}^{-1}$	1	2	3	4	5	Среднее
Дымность, m^{-1}						
1500	0,14	0,15	0,19	0,1	0,21	0,158
2000	0,27	0,31	0,23	0,27	0,18	0,252
2500	0,24	0,23	0,24	0,23	0,16	0,22
3000	0,32	0,34	0,23	0,24	0,16	0,258
Помутнение, %						
1500	8	8	9	9	9	8,6
2000	8	7	10	7	9	8,2
2500	8	11	9	10	11	9,8
3000	10	11	13	10	10	10,8
Часовой расход топлива – 0,94 л/ч						

Table 2
Results of measuring characteristics of the engine running on the fuel with the CSAF Sample 1 added

Таблица 3
Результаты измерений характеристик двигателя внутреннего сгорания при работе на топливе с добавлением КСАТ образца 2

$n, \text{мин}^{-1}$	1	2	3	4	5	Среднее
Дымность, m^{-1}						
1500	0,13	0,11	0,13	0,19	0,12	0,136
2000	0,27	0,19	0,17	0,21	0,15	0,198
2500	0,14	0,15	0,15	0,18	0,13	0,15
3000	0,19	0,25	0,25	0,19	0,19	0,214
Помутнение, %						
1500	7	9	8	8	9	8,2
2000	6	8	8	7	7	7,2
2500	6	7	8	8	7	7,2
3000	8	8	9	9	10	8,8
Часовой расход топлива – 0,88 л/ч						

Table 3
Results of measuring characteristics of the engine running on the fuel with the CSAF Sample 2 added

– для фактора В – $\eta^2_B = 0,327$ (32,7% дисперсии объясняется частотой вращения).

Дисперсионный анализ значений дымности ОГ указывает на значительное влияние типа топлива и частоты вращения коленчатого вала на результаты измерений. При этом взаимодействие факторов математически не подтверждается, то есть эффективность действия катализатора проявляется на всех режимах работы ДВС.



Таблица 4
Результаты измерений характеристик двигателя внутреннего сгорания при работе на топливе с добавлением КСАТ образца 3

$n, \text{мин}^{-1}$	1	2	3	4	5	Среднее
Дымность, м^{-1}						
1500	0,13	0,16	0,12	0,12	0,1	0,126
2000	0,1	0,19	0,26	0,21	0,16	0,184
2500	0,1	0,12	0,16	0,19	0,09	0,132
3000	0,18	0,17	0,19	0,22	0,2	0,192
Помутнение, %						
1500	8	4	7	7	7	6,6
2000	6	7	7	5	5	6
2500	6	8	6	8	8	7,2
3000	8	9	7	7	10	8,2
Часовой расход топлива – 0,84 л/ч						

Расчеты доказывают эффективность действия катализаторов горения моторного топлива на разных режимах работы ДВС. Согласно полученным данным введение катализаторов горения в топливо оказывает значительное влияние на экологические показатели ДВС (20–30% дисперсии значений), что свидетельствует о целесообразности их применения при проведении горнотранспортных работ.

Коэффициенты детерминации для помутнения ОГ:

- для фактора А – $\eta^2_A = 0,305$ (30,5% дисперсии объясняется типом топлива);
- для фактора В – $\eta^2_B = 0,225$ (22,5% дисперсии объясняется частотой вращения).

Таким образом, оба фактора (тип топлива и частота вращения коленчатого вала) статистически значимо влияют как на дымность, так и на помутнение ОГ. При этом взаимодействие факторов (АхВ) незначимо для обоих показателей, то есть разница между типами топлива сохраняется на всех частотах вращения коленчатого вала двигателя.

Таблица 5
Дисперсионный анализ для дымности отработавших газов

Источник вариации	Сумма квадратов SS	Степени свободы df	Средний квадрат MS	F-отношение	F критическое	p-уровень	Значимость
Тип топлива (А)	0,5581	3	0,01860	10,44	2,75	< 0,001	Да
Частота вращения (В)	0,08550	3	0,02850	15,99	2,75	< 0,001	Да
Взаимодействие (АхВ)	0,00634	9	0,000705	0,40	2,00	> 0,05	Нет
Ошибка (внутри групп)	0,11408	64	0,40	–	–	–	–
Итого	0,26174	79	–	–	–	–	–

Таблица 6
Дисперсионный анализ для помутнения отработавших газов

Источник вариации	Сумма квадратов SS	Степени свободы df	Средний квадрат MS	F-отношение	F критическое	p-уровень	Значимость
Тип топлива (А)	57,8375	3	19,272	15,35	2,75	< 0,001	Да
Частота вращения (В)	42,7375	3	14,2458	11,34	2,75	< 0,001	Да
Взаимодействие (АхВ)	8,5125	9	0,9458	0,75	2,00	> 0,05	Нет
Ошибка (внутри групп)	80,4000	64	0,75	–	–	–	–
Итого	189,4875	79	–	–	–	–	–

Таблица 7
Средние значения показателей

Тип топлива	Средняя дымность, м^{-1}	Среднее помутнение, %	Часовой расход топлива, л/ч
Базовое топливо	0,2135	8,35	0,98
Образец 1	0,2220	9,35	0,94
Образец 2	0,1745	7,85	0,88
Образец 3	0,1585	7,00	0,84

Из полученных данных установлено, что наибольшую разницу в часовом расходе топлива показал образец 3. Часовой расход топлива в сравнении с базовым топливом снизился на 14,3% (образец 1 – 4,1%, образец 2 – 11,3%).

Такое значительное снижение расхода топлива обусловлено подбором компонентов, входящих в состав добавки и усиливающих каталитическое действие.

По итогам испытания лучший результат продемонстрировал образец 3 (красный). Максимальное значение дымности ОГ в сравнении с базовым топливом снизилось на 23,8%. Наибольшее снижение дымности было зафиксировано на частоте вращения $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ (29,1%).

Помутнение ОГ является диагностическим показателем, который может указывать на определенные неисправности ДВС, а его уменьшение свидетельствует о более корректной работе дизельного двигателя. По результатам экспериментальных исследований помутнения ОГ лучший результат показал образец 3 (красный). Максимальное значение данного показателя в сравнении с базовым топливом снизилось на 12,7%.

Заключение

Катализаторы горения оказывают целенаправленное воздействие на протекание химических процессов в камере сгорания, способствуя увеличению скорости и полноты горения при сниженной температуре. Добавки такого типа имеют потенциал применения на горных транспортных

Table 5
Analysis of variance for exhaust gas smoke

Source of variation	Sum of squares SS	Degrees of freedom df	Mean square MS	F-ratio	F critical	p-level	Significance
Fuel type (A)	0,5581	3	0,01860	10,44	2,75	< 0,001	Yes
Rotation speed (B)	0,08550	3	0,02850	15,99	2,75	< 0,001	Yes
Interaction (AxB)	0,00634	9	0,000705	0,40	2,00	> 0,05	No
Error (within groups)	0,11408	64	0,40	–	–	–	–
Total	0,26174	79	–	–	–	–	–

Table 6
Analysis of variance for exhaust gas opacity

Source of variation	Sum of squares SS	Degrees of freedom df	Mean square MS	F-ratio	F critical	p-level	Significance
Fuel type (A)	57,8375	3	19,272	15,35	2,75	< 0,001	Yes
Rotation speed (B)	42,7375	3	14,2458	11,34	2,75	< 0,001	Yes
Interaction (AxB)	8,5125	9	0,9458	0,75	2,00	> 0,05	No
Error (within groups)	80,4000	64	0,75	–	–	–	–
Total	189,4875	79	–	–	–	–	–



машинах, так как они применяются в очень малых концентрациях, не изменяют физико-химические свойства базового топлива, что обеспечивает сохранение технических требований к топливу. Для испытаний по определению влияния катализаторов горения моторного топлива на показатели работы дизельного ДВС использовались три вида КСАТ «Ормекс», различающихся процентным соотношением компонентов. По итогам проведенных испытаний все образцы КСАТ показали высокую эффективность применения, улучшив показатели работы дизельного двигателя в сопоставлении с базовым дизельным топливом. Наилучший результат по всем характеристикам показал образец 3 КСАТ «Ормекс» (красный), содержащий 30% фуллеридов щелочных металлов и 10% карбоновых кислот. Дымность ОГ снизилась на 29,1%, помутнение – на 12,7%, часовой расход топлива – на 14,3%. Полученные результаты доказывают эффективность применения катализаторов горения топлива на дизельных ДВС горных транспортных машин.

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что наибольшую эффективность показал образец топлива, испытываемый в последнюю очередь, что свидетельствует о наличии синергетического эффекта от действия добавок. Таким образом, при увеличении длительности испытаний образцов на ДВС появляется возможность повышения эффективности от применения КСАТ. Дальнейшее проведение экспериментальных исследований влияния топлива с КСАТ на ДВС предполагает испытания с большим периодом наработки на модифицированном топливе и исследование влияния концентрации применяемой добавки.

Таким образом, применение катализаторов горения моторного топлива оказывает положительное влияние на эксплуатационные, технико-экономические и экологические показатели работы ДВС, повышает надежность топливной аппаратуры и деталей цилиндропоршневой группы дизельных двигателей горных транспортных машин.

Список литературы / References

1. Tsvetkov P., Andreichyk A., Kosarev O. The impact of economic development of primary and secondary industries on national CO₂ emissions: The case of Russian regions. *Journal of Environmental Management*. 2024;351:119881. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119881>
2. Билло Е.В., Сухаревская Е.С. Присадки для топлива на различной основе. В кн.: Вострецов А.И. (ред.) *Последние тенденции в области науки и образования: материалы Междунар. (заочной) науч.-практ. конф., г. Душанбе, 3 февраля 2017 г.* Нефтекамск: Мир науки; 2017. С. 12–15.
3. Шумков А.П., Чиркова Ю.Н., Земский Д.Н. Присадки к дизельному топливу. *Современные научные исследования и разработки*. 2018;(7):238–241.
Shumkov A.P., Chirkova U.N., Zemsky D.N. Additives to diesel fuel. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Razrabotki*. 2018;(7):238–241. (In Russ.)
4. Данилов А.М. Классификация присадок и добавок к топливам. *Нефтепереработка и нефтехимия*. 1997;(6):11–14.
Danilov A.M. Classification of fuel additives and admixtures. *Oil Refining and Petrochemistry*. 1997;(6):11–14. (In Russ.)
5. Киташов Ю.Н., Назаров А.В. Перспективные присадки для активации процессов горения топлив. *Альманах мировой науки*. 2016;(1-1):68–70.
Kitashov Yu.N., Nazarov A.V. Promising additives to enhance fuel combustion processes. *Almanakh Mirovoi Nauki*. 2016;(1-1):68–70. (In Russ.)
6. Безюков О.К., Жуков В.А., Маад М.М. Современные присадки к дизельному топливу. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2016;(1):28–33. Режим доступа: <https://vestnik.astu.ru/ru/nauka/article/31769/view> (дата обращения: 13.04.2026).
Bezyukov O.K., Zhukov V.A., Maad M.M. Modern additives for diesel fuel. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2016;(1):28–33. (In Russ.) Available at: <https://vestnik.astu.ru/ru/nauka/article/31769/view> (accessed: 13.04.2026).
7. Гулаков М.Ю., Бунина А.А., Аверьянов А.А., Денисюк А.П. Различные железосодержащие катализаторы горения для составов на основе нитрата аммония. *Успехи в химии и химической технологии*. 2023;37(10):6–9.
Gulakov M.Yu., Bunina A.A., Averyanov A.A., Denisyuk A.P. Iron burning rate catalysts for propellants based on ammonium nitrate. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023;37(10):6–9. (In Russ.)
8. Аунг З.Н., Демидова Л.А., Денисюк А.П. Влияние катализаторов на скорость горения ароматических нитросоединений. *Успехи в химии и химической технологии*. 2022;36(13):202–205.
Aung Z.N., Demidova L.A., Denisyuk A.P. The effect of catalysts on the burning rate of aromatic nitro compounds gorenje. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2022;36(13):202–205. (In Russ.)
9. Коршунов Г.И., Еремеева А.М., Дребенштетт К. Обоснование применения растительной добавки к дизельному топливу в качестве способа защиты подземного персонала угольных шахт от воздействия вредных выбросов дизель-гидравлических локомотивов. *Записки Горного института*. 2021;247:39–47. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>
Korshunov G.I., Eremeeva A.M., Drebenstedt C. Justification of the use of a vegetal additive to diesel fuel as a method of protecting underground personnel of coal mines from the impact of harmful emissions of diesel-hydraulic locomotives. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:39–47. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.5>
10. Eremeeva A.M., Kondrasheva N.K., Khasanov A.F., Oleynik I.L. Environmentally friendly diesel fuel obtained from vegetable raw materials and hydrocarbon crude. *Energies*. 2023;16(5):2121. <https://doi.org/10.3390/en16052121>



11. Сафиуллин Р.Н., Сафиуллин Р.Р., Сорокин К.В. Метод оценки и прогнозирования технического состояния ресурсных элементов карьерных самосвалов на основе контрольных карт Шухарта. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(7):111–124. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_7_0_111
Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V. Assessment and prediction of technical condition of dump truck life components using the Shewhart control charts. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(7):111–124. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_7_0_111
12. Kuzmin K.A., Ivkin A.S., Vovk M.A., Rudko V.A. Pour point depressant efficacy for diesel fuels with different n-paraffin distribution. *Fuel*. 2025;392:134885. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.134885>
13. Каримов О.Х., Каримов Э.Х., Касьянова Л.З., Идрисова В.А., Быковский В.С., Вахитова Р.Р. Из истории развития катализа в России первой половины XIX века. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(1):446. Режим доступа: <https://science-education.ru/article/view?id=12097> (дата обращения: 13.04.2026).
Karimov O.Kh., Karimov E.Kh., Kasyanova L.Z., Idrisova V.A., Bykovskiy V.S., Vakhitova R.R. About history of catalysis in Russia of first half of XIX century. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;(1):446. (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/article/view?id=12097> (accessed: 13.04.2026).
14. Ганкин В.Ю., Ганкин Ю.В. *Новая общая теория химической связи, кинетики и катализа*. Ленинград: Химия; 1991. 80 с. Режим доступа: https://itchem.ru/f/novaya_obschaya_teoriya_kataliza.pdf (дата обращения: 13.04.2026).
15. Усенко А.Е. *Теория и практика катализа №УД-4123/уч.* Минск: БГУ; 2017. 21 с. Режим доступа: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/184404> (дата обращения: 07.02.2026).
16. Баландин А.А. Мультиплетная теория катализа. Энергетические факторы в катализе. *Успехи химии*. 1964;33(5):258–275. <https://doi.org/10.1070/RC1964v033n05ABEH001407>
Balandin A.A. The multiplet theory of catalysis – energy factors in catalysis. *Russian Chemical Reviews*. 1964;33(5):258–275. <https://doi.org/10.1070/RC1964v033n05ABEH001407>
17. Чуприн И.А. Основы предвидения каталитического действия с точки зрения мультиплетной теории катализа. В кн.: Сукиасян А.А. (ред.) *Инновационные практики в междисциплинарных исследованиях: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., г. Ижевск, 20 января 2026 г.* Уфа: Аэтерна; 2026. С. 34–37.
18. Кривовичев С.В. Теология и термодинамика жизни и сознания в научном наследии Николая Ивановича Кобозева. *Вопросы теологии*. 2023;5(3):369–387. <https://doi.org/10.21638/spbu28.2023.302>
Krivovichev S.V. Theology and thermodynamics of life and mind in the scientific legacy of Nikolay Ivanovich Kobozev. *Issues of Theology*. 2023;5(3):369–387. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu28.2023.302>
19. Каменев В.Ф., Леонов А.В. Исследование влияния присадки «ГРИБУСТЕР-Б» на технико-экономические и экологические характеристики бензиновых автомобильных двигателей. *Журнал автомобильных инженеров*. 2017;(5):50–56.
Kamenev V.F., Leonov A.V. Investigation of the influence of GRINBUSTER-B additive on techno-economic and environmental characteristics of petrol automobile engines. *Zhurnal Avtomobilnykh Inzhenerov*. 2017;(5):50–56. (In Russ.)
20. Минибаева Л.К., Усманов Р.Р., Баулин О.А. Исследование влияния эффективности промоторов воспламенения на показатели качества дизельного топлива. *Башкирский химический журнал*. 2012;19(1):149–153.
Minibaeva L.K., Usmanov R.R., Bauhin O.A. Research on the effectiveness of ignition promoters on the quality of diesel fuel. *Bashkir Chemical Journal*. 2012;19(1):149–153. (In Russ.)
21. Втюрина М.Н., Пляго А.В. Исследование свойств этанола-топливных эмульсий с присадками. *Транспортные системы*. 2017;(2):51–54. https://doi.org/10.46960/62045_2017_2_51
Vtyurina M.N., Plyago A.V. Studying properties of ethanol-fuel emulsions with additives. *Transport Systems*. 2017;(2):51–54. https://doi.org/10.46960/62045_2017_2_51
22. Dobrzyńska E., Szewczyńska M., Puchałka B., Szczotka A., Woodburn J. The effect of nano-additives on diesel engine exhaust emissions. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2022;31(1):25–33. <https://doi.org/10.15244/pjoes/138209>
23. Tkaczyk M., Sroka Z.J., Krakowian K., Wlostowski R. Experimental study of the effect of fuel catalytic additive on specific fuel consumption and exhaust emissions in diesel engine. *Energies*. 2021;14(1):54. <https://doi.org/10.3390/en14010054>
24. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Тимофеев М.И., Лавренко С.А. Моделирование и оптимизация использования проходческих комплексов при строительстве вспомогательных выработок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(12-3):117–135. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_117
Jungmeister D.A., Urazbahtin R.J., Timofeev M.I., Lavrenko S.A. Modeling and optimization of the use of tunneling complexes in the construction of auxiliary workings. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(12-3):117–135. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_123_0_117
25. Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю., Нгуен К.Л., Тимофеев М.И. Комплекс для создания хранилищ особо опасных отходов: обоснование конструкции и параметров. *Обогащение руд*. 2023;(6):47–51. <https://doi.org/10.17580/or.2023.06.08>
Yungmeister D.A., Urazbakhtin R.Yu., Nguyen K.L., Timofeev M.I. Tunneling complex for the construction of especially hazardous waste storage facilities: justification of the design and parameters. *Obogashchenie Rud*. 2023;(6):47–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/or.2023.06.08>
26. Grigoreva L., Katsuba Yu. Surfactants for the extraction of residual oil. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020;15(4):552–555. Available at: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2020/jeas_0220_8128.pdf (accessed: 13.04.2026).
27. Wilkins A.J.J., Hannington N.A. The Effect of fuel and oil additives on automobile catalyst performance. *Platinum Metals Review*. 1990;34(1):16–24. <https://doi.org/10.1595/003214090X3411624>



28. Babyr N.V., Kuziev D.A., Sazankova E.S., Dobler M.O. Influence of cyclic impacts of powered roof support on weakening of immediate roof rocks. *Eurasian Mining*. 2026;(1):14–19. Available at: <https://www.rudmet.ru/journal/2523/article/41017/> (accessed: 17.04.2026).
29. Даманский Р.В. Оптимизация эксплуатационных свойств дизельного топлива применением присадки в работе машинно-тракторных агрегатов. *Вестник Омского государственного аграрного университета*. 2023;(1):139–144. https://doi.org/10.48136/2222-0364_2023_1_139
Damanskij R.V. Optimization of the performance properties of diesel fuel using additives in the operation of machine and tractor units. *Vestnik of Omsk SAU*. 2023;(1):139–144. (In Russ.) https://doi.org/10.48136/2222-0364_2023_1_139
30. Дука А.А., Пашкевич М.А., Сверхков И.П. Повышение эффективности термической утилизации низкосортного угольного сырья путём внесения добавок карбонатов щелочных металлов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(11-1):113–130. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/113.pdf> (дата обращения: 21.03.2026).
Duka A.A., Pashkevich M.A., Sverchkov I.P. Efficiency enhancement of thermal utilization of low-grade carbon-containing raw materials by adding alkali metal carbonates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(11-1):113–130. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/113.pdf> (accessed: 21.03.2026).
31. Botyan E.Y., Lavrenko S.A., Pushkarev A.E. Evaluation of complicated mining exploitation conditions influence on service life of open pit trucks suspensions with remote monitoring systems. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024;37(11):2268–2275. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.11b.12>
32. Зеньков И.В., Кустикова Е.А., Хунг Ч.Л., Дмитриева М.Л., Юронен Ю.П., Черепанов Е.В. и др. Результаты дистанционного мониторинга технологического потенциала и экологии открытых горных работ на месторождениях минерального сырья для производства щебня. *Экология и промышленность России*. 2024;28(1):40–45. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-40-45>
Zenkov I.V., Kustikova E.A., Hung T.L., M Dmitrieva L., Yuronen Yu.P., Cherepanov E.V. et al. Results of remote monitoring of the technological potential and ecology of open-pit mining at mineral deposits for the production of crushed stone. *Ecology and Industry of Russia*. 2024;28(1):40–45. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-1-40-45>
33. Цветков П.С. Кластерный подход к улавливанию и транспортировке промышленного CO₂: экономия за счет совместной инфраструктуры. *Записки Горного института*. 2025;275:110–129. Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16796> (дата обращения: 21.03.2026).
Tsvetkov P.S. Cluster approach for industrial CO₂ capture and transport: savings via shared infrastructure. *Journal of Mining Institute*. 2025;275:110–129. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16796> (accessed: 21.03.2026).
34. Серегин А.С., Фазылов И.Р., Прохорова Е.А. Обоснование безопасных условий работы горнотранспортных машин с двигателями внутреннего сгорания по фактору выделения загрязняющих веществ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(11):37–51. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_37
Seregin A.S., Fazylov I.R., Prokhorova E.A. Justification of safe operating conditions for mining transportation machines powered by internal combustion engines using air pollutant emission criterion. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(11):37–51. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_11_0_37
35. Fetisov V., Gonopolsky A.M., Davardoost H., Ghanbari A.R., Mohammadi A.H. Regulation and impact of VOC and CO₂ emissions on low-carbon energy systems resilient to climate change: a case study on an environmental issue in the oil and gas industry. *Energy Science & Engineering*. 2023;11(4):1516–1535. <https://doi.org/10.1002/ese3.1383>

Информация об авторах

Кацуба Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-2698-491X>; e-mail: rectorat@spmi.ru

Макаров Александр Александрович – генеральный директор, Научно-производственное предприятие «Инновационный экспресс», Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: ormex@mail.ru

Григорьева Людмила Владиславовна – кандидат химических наук, доцент, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3287-5947>; e-mail: rectorat@spmi.ru

Жужнев Егор Владимирович – сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: rectorat@spmi.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 07.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 17.08.2026

Information about the authors

Yuri N. Katsuba – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-2698-491X>; e-mail: rectorat@spmi.ru

Alexander A. Makarov – General Director, Scientific and Production Enterprise “Innovational Express” (LLC RPE Innex), Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: ormex@mail.ru

Lyudmila V. Grigoreva – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3287-5947>; e-mail: rectorat@spmi.ru

Egor V. Zhuzhnev – Researcher, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: rectorat@spmi.ru

Article info

Received: 07.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 17.08.2026