

Научная статья

УДК 621.43:504.3

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-73-84

Каюмов Умиджон Эркинович, Джураев Рустам Умарханович,
Пардаева Шахло Сахибжоновна

Навоийский государственный горно-технологический университет

* для корреспонденции: kayumov_umidjon@mail.ru

СНИЖЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ГОРНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ



Информация о статье

Поступила:

29 марта 2026 г.

Одобрена после

рецензирования:

01 сентября 2026 г.

Принята к печати:

15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:

ДВС, выпускная система, топливо, отработавшие газы, токсичность, сажа, электростатический фильтр, каталитический нейтрализатор, экология

Аннотация.

Рост объемов добычи полезных ископаемых сопровождается увеличением количества карьерной техники, что приводит к существенному росту выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. В условиях глубоких карьеров с ограниченным воздухообменом это вызывает накопление токсичных компонентов отработавших газов, ухудшение экологической обстановки и повышение риска для здоровья персонала. В связи с этим проблема снижения вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания является актуальной научно-технической задачей. Работа посвящена исследованию состава отработавших газов дизельных двигателей горных машин, анализу механизмов образования токсичных компонентов и оценке эффективности современных методов их очистки. Рассматриваются особенности формирования оксидов углерода, оксидов азота, углеводородов и твердых частиц в различных режимах работы двигателя. В ходе исследования установлено, что основными причинами повышения токсичности выхлопа являются неполное сгорание топлива, неравномерность смесеобразования и наличие пристеночных зон гашения пламени. Показано, что традиционные каталитические нейтрализаторы эффективны преимущественно для газообразных компонентов, но имеют ограниченные возможности по улавливанию твердых частиц. Обоснована целесообразность применения комбинированной системы очистки, включающей каталитический нейтрализатор и электростатический фильтр. Установлено, что использование электрофильтра позволяет улавливать до 90–99% мелкодисперсных частиц без значительного увеличения противодавления. Предложенное решение обеспечивает комплексное снижение токсичности отработавших газов и повышение экологической эффективности эксплуатации горной техники.

Для цитирования: Каюмов У.Э., Джураев Р.У., Пардаева Ш.С. Снижение вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания горных машин с использованием комбинированной системы очистки // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 73-84. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-73-84, EDN: PFZLED

Введение

Потребность в твердых полезных ископаемых демонстрирует устойчивую тенденцию к росту из года в год, что обусловлено как глобальным спросом на сырьевые ресурсы, так и активным развитием промышленного сектора. Стратегические программы модернизации горнодобывающей отрасли, в том числе в сфере освоения золоторудных месторождений, ориентированы на последовательное наращивание объемов добычи.

На практике можно отметить, что при увеличении добычи даже на 15-20% парк карьерных само-

свалов возрастает в среднем на 25-30%, поскольку требуется не только расширение мощностей, но и резервирование техники для обеспечения бесперебойной работы в тяжелых горно-геологических условиях золоторудных карьеров [1–3].

Таким образом, рост добычи полезных ископаемых напрямую коррелирует с масштабным развитием карьерной инфраструктуры и ускоренным внедрением современных технологических решений в области эксплуатации горной техники.

По мере увеличения глубины и протяженности карьерных выработок, а также усложнения горно-

геологических условий золоторудных месторождений технологические процессы становятся более интенсивными и пространственно ограниченными. В таких условиях происходит неизбежная концентрация большого количества техники на относительно небольших рабочих горизонтах.

Дополнительным фактором является рост объемов открытых горных работ за последние годы, что напрямую связано с увеличением потребления дизельного топлива карьерным автотранспортом. В реальных условиях эксплуатации до 70-80% топлива расходуется именно тяжело нагруженными автосамосвалами при движении на подъеме с низкой скоростью. Это наиболее энергоемкий режим работы двигателя, сопровождающийся неполным сгоранием топлива.

В результате в атмосферу карьера поступает значительный объем вредных компонентов выхлопных газов: оксиды углерода (CO , CO_2), оксиды азота (NO_x), несгоревшие углеводороды, альдегиды, сажа и твердые частицы, соединения серы и следовые тяжелые металлы.

В глубоких золоторудных карьерах при интенсивной работе транспорта локальные концентрации NO_x и сажи в зонах подъемных дорог могут превышать фоновые значения в несколько раз, особенно в часы пиковой нагрузки. Это не только экологическая, но и серьезная производственная проблема, влияющая на здоровье персонала, ресурс техники и общую устойчивость технологического процесса.

Таким образом, увеличение масштабов добычи сопровождается не просто ростом производительности, а формированием качественно новых требований к экологическому контролю, топливной эффективности и системам очистки выхлопных газов карьерной техники.

Отработавшие газы двигателя внутреннего сго-

рания (ДВС) представляют собой крайне сложную по составу дисперсную систему. Это не просто газовая среда, а многокомпонентная смесь, включающая газы, пары, аэрозоли жидкостей и твердые микрочастицы. По результатам инструментальных замеров и хроматографических исследований общее количество различных химических соединений в составе выхлопа может превышать тысячу наименований.

С теоретической позиции при абсолютно полном и стехиометрически сбалансированном сгорании углеводородного топлива в воздушной среде продукты должны быть предельно «чистыми» и ограничиваться тремя основными компонентами: азотом (N_2), углекислым газом (CO_2) и водяным паром (H_2O) [4–5].

Преобразование топливной энергии в ДВС и типичный состав отработавших газов дизельного двигателя представлены на Рис. 1.

Методы

В реальных условиях эксплуатации, особенно в тяжелых режимах работы дизельных двигателей карьерной техники (неполная нагрузка, переходные режимы, работа на подъемах), процесс сгорания далек от идеального. В результате в составе выхлопных газов неизбежно присутствуют: оксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (C_xH_y), альдегидные соединения, твердые частицы (сажа, зольные остатки), оксиды азота (NO_x), перекисные и другие промежуточные продукты окисления, избыточный кислород [6–7].

Суммарная доля всех токсичных примесей в общем объеме выхлопа на первый взгляд ничтожно мала – как правило, менее 1-2% для бензиновых двигателей и даже ниже 0,3% для дизельных установок.

На диаграммах, приведенных на Рис. 2 и 3, представлены составы отработавших газов бензиновых и дизельных двигателей.

Даже «микроскопическая» фракция токсичных примесей определяет экологическую опасность двигателя. Причина в том, что даже малые концентрации оксида углерода, оксидов азота и мелкодисперсной сажи обладают высокой токсичностью и способностью накапливаться как в атмосфере карьера, так и в организме человека.

В реальных условиях карьеров это хорошо видно: визуально выхлоп может казаться незначительным, но приборный контроль (газоанализаторы, дымомеры) фиксирует превышения по ключевым компонентам, особенно при работе техники в тяжелых режимах. Именно поэтому в современной практике основное внимание уделяется не общему объему

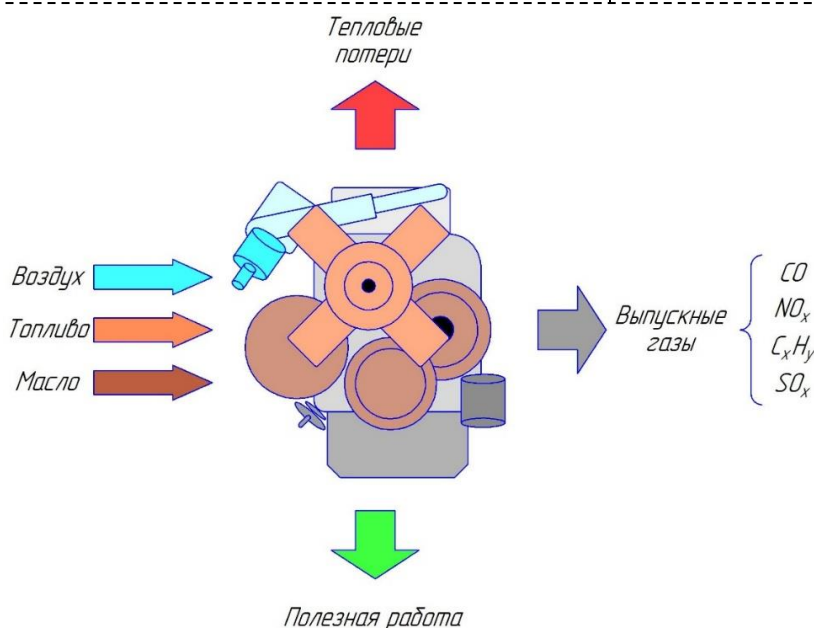


Рис. 1. Преобразование топливной энергии и типичный состав отработавших газов дизельного двигателя внутреннего сгорания
Fig. 1. Conversion of fuel energy and the typical composition of exhaust gases of a diesel internal combustion engine

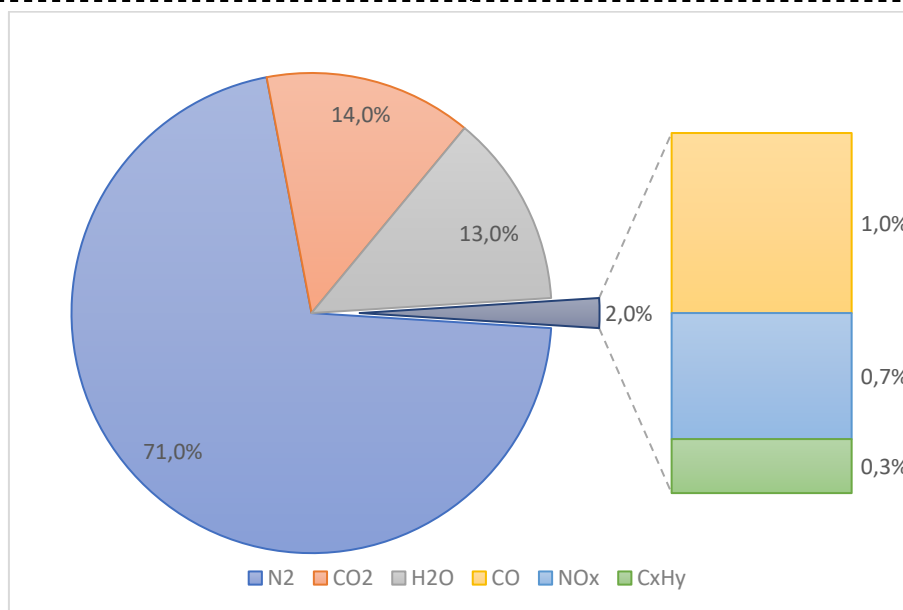


Рис. 2. Состав отработавших газов бензиновых двигателей
Fig. 2. Composition of exhaust gases of gasoline engines

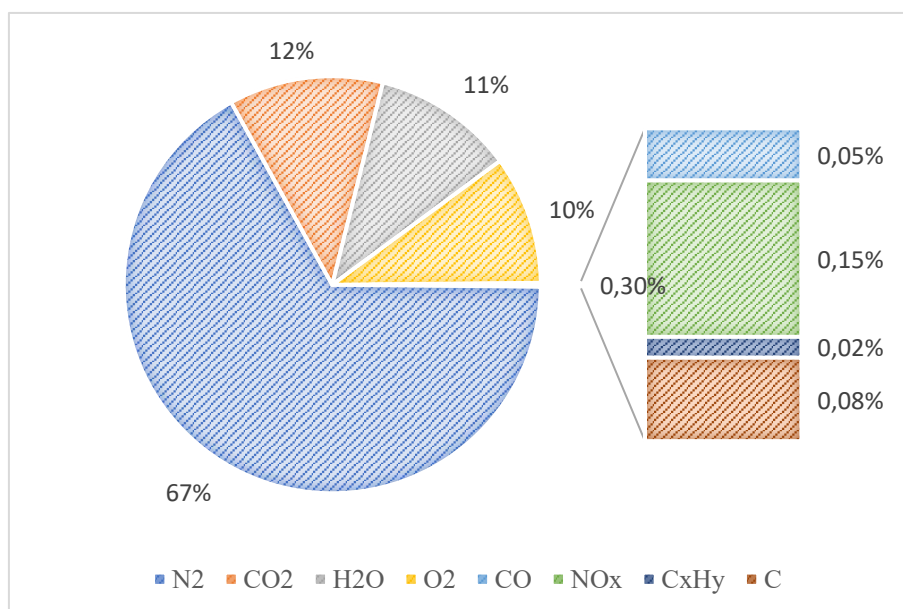


Рис. 3. Состав отработавших газов дизельных двигателей
Fig. 3. Composition of exhaust gases of diesel engines

выхлопа, а качественному составу его наиболее опасной части. Ниже в Таблице 1 приведен состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания [8].

В рабочем объеме цилиндра двигателя внутреннего сгорания сгорает не только подаваемое топливо. В процессе эксплуатации неизбежно происходит попадание тонкой пленки моторного масла со стенок цилиндра в зону горения. Это явление в инженерной практике известно как «угар масла».

Даже в современных, технически исправных двигателях его величина не равна нулю и, как показывают эксплуатационные замеры, обычно составляет порядка 0,15-0,30% от расхода топлива. На первый взгляд показатель небольшой, но в условиях круглосуточной работы карьерной техники он приобретает существенное значение.

Ключевая проблема заключается в том, что масло по своим физико-химическим свойствам существенно отличается от дизельного топлива. Оно хуже испаряется, имеет более сложный состав и содержит пакет присадок, включающих соединения металлов (кальций, цинк, фосфор и др.). В результате его сгорание протекает неполно и сопровождается образованием дополнительных вредных компонентов.

При повышенном угаре масла резко возрастает дымность выхлопа, увеличивается содержание твердых частиц и зольных остатков. Это напрямую связано с тем, что несгоревшие или частично окисленные фрагменты масла формируют сажевые агломераты, а металлические присадки переходят в состав твердой фазы выхлопа.

Таблица 1. Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания
Table 1. Composition of exhaust gases of internal combustion engines

Компонент отработавших газов	Концентрация в отработавших газах		Токсичные компоненты отработавших газов дизелей на режиме полной нагрузки	
	Бензиновый Двигатель	Дизель	Концентрация, г/м ³	Удельный выброс, г/(кВт ч)
Азот, N ₂	74 - 77%	74 - 78%	-	-
Кислород, O ₂	0.3 - 8%	2,0 - 18%	-	-
Водяной пар, H ₂ O	3.0 - 5.5%	0,5 - 9,0%	15 - 100	-
Диоксид углерода, CO ₂	5.0 - 12.0%	1,0 - 12,0%	40 - 240	-
Оксиды азота NO _x	0.01 - 0.8%		1,0 - 8	10 - 30
в том числе:				
- монооксид азота, NO	-	0,004 - 0,5%	1,0 - 4,5	6 - 18
- диоксид азота, NO ₂	-	0,00013 - 0,013%	0,1 - 0,8	0,5 - 2,0
Монооксид углерода CO	0.5 - 12%	0,005 - 0,4%	0,25 - 2,5	1,5 - 12,0
Углеводороды, C _x H _y	0.2 - 3.0%	0,009 - 0,3%	0,25 - 2,0	1,5 - 8,0
Бензапирен, C ₂₀ H ₁₂	0 - 20мкг/м ³	0,05 - 1%	0,2 · 10 ⁻⁶ – 0,5 · 10 ⁻⁶	1 · 10 ⁻⁶ – 2 · 10 ⁻⁶
Сажа, C	0 - 0,04г/м ³	0,01 - 1,1 г/м ³	0,05 - 0,5	0,25 - 2,0
Диоксид серы, SO ₂	-	0,0018 - 0,02%	0,1 - 0,5	0,4 - 2,5
Триоксид серы, SO ₃	-	0,00004 - 0,0006%	-	-
Альдегиды RCHO, в том числе:				
- формальдегид, HCHO	-	0,0001 - 0,0019%	-	-
- акролеин, CHCHO	-	0,0001 - 0,00013%	0,001 - 0,04	0,06 - 0,2

Таким образом, даже незначительное поступление масла в камеру сгорания приводит к росту концентрации твердых частиц (PM), увеличению токсичности выхлопных газов, ускоренному загрязнению систем выпуска и очистки, снижению экологических характеристик двигателя в целом.

С практической точки зрения важно отметить, что в дизельных двигателях содержание СО в выхлопе, как правило, относительно невелико, в исправных установках оно редко превышает 0,5%. Это связано с работой на обедненных топливовоздушных смесях и с избытком кислорода. Тем не менее, даже такие концентрации требуют контроля, особенно в замкнутых или плохо проветриваемых зонах, например, в глубоких карьерах [9–12].

Важную роль играет последующая стадия процессов в цилиндре и выпускной системе. Если в продуктах сгорания присутствует избыточный кислород, оксид углерода частично окисляется до СО₂ уже на стадии расширения и даже в выпускном коллекторе. Это подтверждается экспериментальными замерами: концентрация СО заметно снижается по мере продвижения газов по тракту выпуска.

На Рис. 4 графически показана зависимость объемной концентрации оксида углерода (СО, %) в отработавших газах дизельного двигателя от воздушно-топливного соотношения или, эквивалентно, коэффициента избытка воздуха α.

Диапазон изменения параметра воздушно-топливного соотношения по оси абсцисс составляет приблизительно от 12 до 24, что соответствует переходу от обогащенных к сильно обедненным смесям. Ключевая область, соответствующая стехиометрическому составу (α≈1), локализуется вблизи

значения воздушно-топливного соотношения (составляет 14,7).

Характер кривой демонстрирует монотонное снижение концентрации СО с увеличением воздушно-топливного соотношения.

Из практики эксплуатации можно четко проследить зависимость: при работе двигателя на обедненных смесях уровень СО минимален, тогда как при переобогащении смеси (например, при неисправностях топливной аппаратуры или перегрузке) его содержание резко возрастает.

Таким образом, несмотря на относительно небольшую долю в общем составе выхлопа, оксид углерода остается важным индикатором качества процесса сгорания и технического состояния двигателя, а также существенным фактором риска в условиях ограниченного воздухообмена.

Легкие газообразные углеводороды (C_xH_y), фиксируемые в составе выхлопа, формируются в результате сложного комплекса термохимических процессов, протекающих в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Их появление связано прежде всего с неполным превращением топлива в зоне горения.

На практике можно выделить несколько ключевых механизмов их образования. Во-первых, это термическое разложение топлива в начальной зоне факела распыла, где условия еще далеки от оптимальных для полного сгорания. Во-вторых, существенный вклад дает топливная пленка, образующаяся на стенках цилиндра, особенно при несовершенном распыливании. Дополнительно влияние оказывает вторичный впрыск (подвпрыск), при котором часть топлива не успевает полноценно окислиться [13–14].

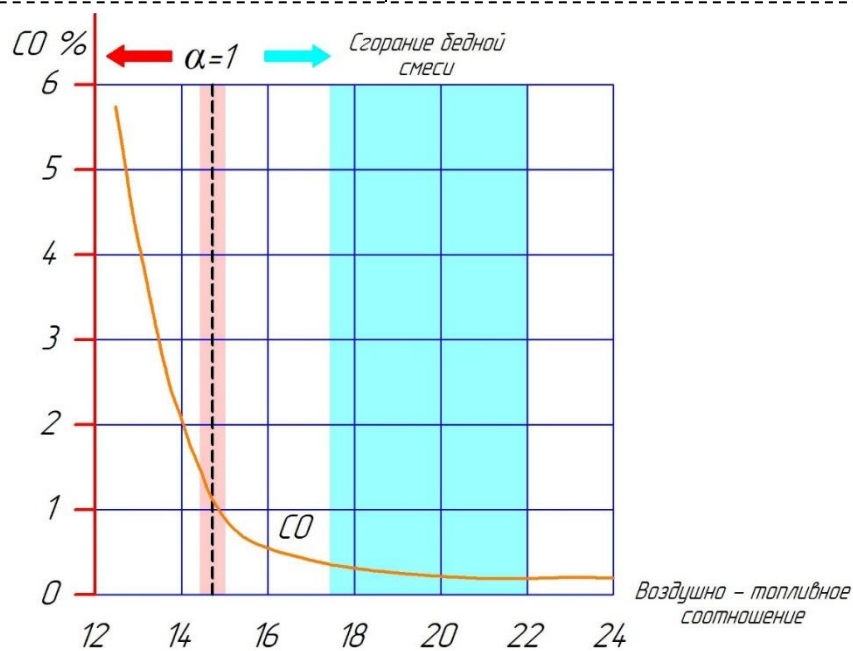


Рис. 4. Характер изменения концентрации оксида углерода (CO) в отработавших газах в зависимости от состава топливовоздушной смеси

Fig. 4. Variation of carbon monoxide (CO) concentration in exhaust gases as a function of the air-fuel mixture composition

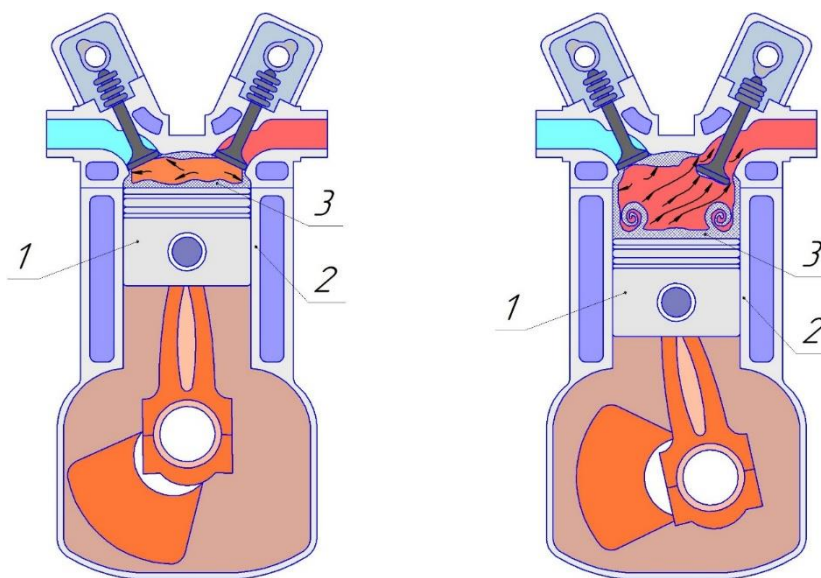


Рис. 5. Зоны гашения пламени в камере сгорания
1 – поршень, 2 – гильза цилиндра, 3 – топливная пленка

Fig. 5. Flame quenching zones in the combustion chamber
1 – piston; 2 – cylinder liner; 3 – fuel film

Однако, если исходить из многолетних наблюдений, наиболее значимым фактором остается наличие так называемых «холодных» пристеночных зон. Когда пламя распространяется от центра факела к стенке цилиндра, оно сталкивается с интенсивным теплоотводом. В результате активные радикалы, обеспечивающие окисление, теряют энергию и рекомбинируют, не завершив реакцию. В тонком слое у стенки (порядка нескольких микрон – до десятых долей миллиметра) остаются частицы частично окисленного топлива, которые затем выходят с выхлопом в виде углеводородов. Зоны гаше-

ния пламени в камере сгорания визуально показаны на Рис. 5.

Еще одна важная причина – неравномерность распределения воздуха в камере сгорания. В реальных условиях всегда присутствуют зоны с недостатком кислорода, где топливо не догорает. Такие области характерны для зазоров между поршнем и цилиндром, пространства над первым поршневым кольцом, областей вокруг клапанов, локальных переобогащенных участков внутри камеры.

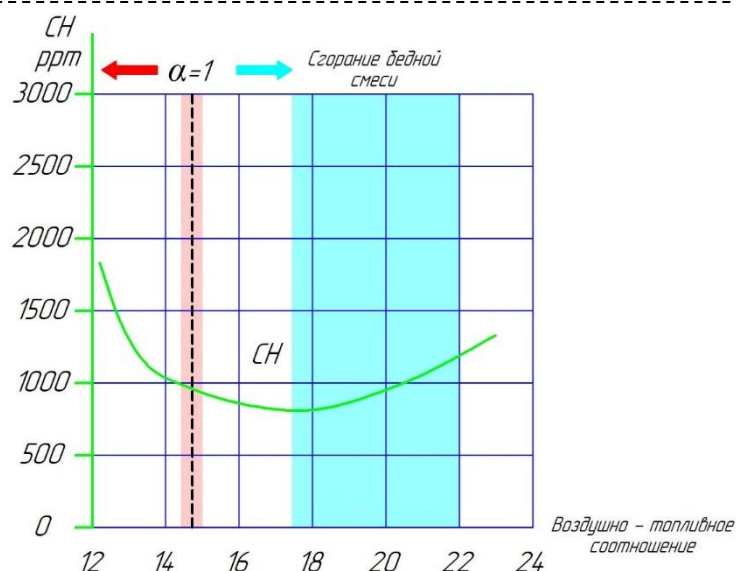


Рис 6. Зависимость концентрации углеводородов (C_nH_m) в отработавших газах от состава топливовоздушной смеси

Fig. 6. Dependence of hydrocarbon (C_nH_m) concentration in exhaust gases on the air-fuel mixture composition

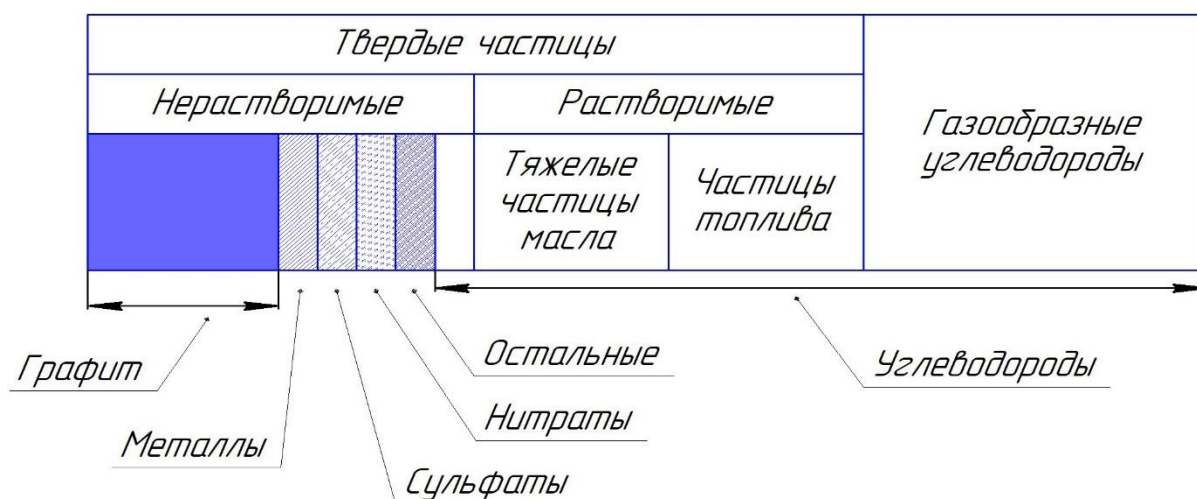


Рис 7. Компонентный состав твердых частиц в отработавших газах

Fig. 7. Component composition of solid particles in exhaust gases

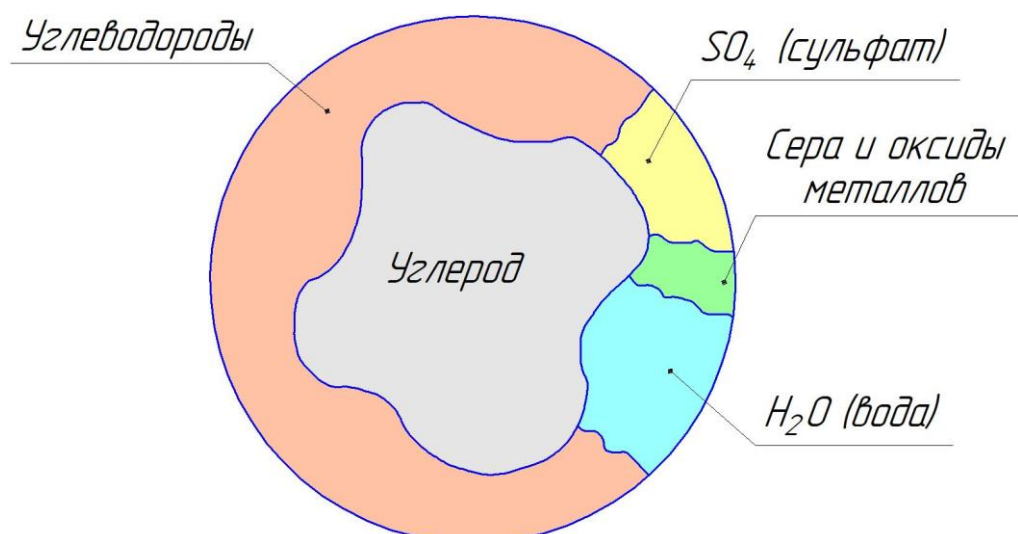


Рис. 8. Схематическое представление структуры твердой частицы в отработавших газах

Fig. 8. Schematic representation of the structure of a solid particle in exhaust gases

В этих микрозонах пламя либо не распространяется вовсе, либо протекает с образованием продуктов пиролиза, что ведет к накоплению несгоревших углеводородов.

Из практики испытаний также можно отметить важный момент: увеличение выбросов углеводородов наблюдается не только при богатых смесях, но и при чрезмерно бедных. В последнем случае происходит срыв или затухание пламени, а также пропуски воспламенения, что резко увеличивает содержание $CxHy$ в выхлопе [15–16].

На Рис. 6 представлен график, где показана зависимость концентрации несгоревших углеводородов (СН) в отработавших газах дизельного двигателя от воздушно-топливного соотношения.

Следует отметить, что для дизельных двигателей характерна работа преимущественно на обедненных смесях ($\alpha > 1$), а процесс смесеобразования носит гетерогенный (неоднородный) характер. В связи с этим распределение топлива и воздуха в камере сгорания существенно влияет на полноту окисления углеводородов.

Уровень выбросов углеводородов определяется не одним фактором, а совокупностью конструктивных особенностей двигателя, качества распыла, теплового состояния стенок цилиндра и, что особенно важно, состава топливовоздушной смеси. В реальных условиях эксплуатации именно оптимизация этих параметров дает наибольший эффект по снижению СН в выхлопе [17–18].

В составе отработавших газов двигателя внутреннего сгорания присутствуют не только газообразные компоненты, но и дисперсная твердая фаза. Эти частицы по своим размерам сопоставимы с пылевыми аэрозолями и представляют серьезную опасность как для человека, так и для окружающей среды. Компонентный состав твердых частиц в отработавших газах представлен на Рис. 7.

Ключевой особенностью дизельных двигателей является склонность к образованию сажи в процессе сгорания топлива. Ее количество в выхлопе напрямую зависит от условий смесеобразования и протекания процесса горения. Сажа фактически является «каркасом» твердых частиц. На ее поверхности адсорбируются тяжелые углеводороды, зольные остатки от сгорания присадок масла и топлива, а также микрочастицы износа деталей. В результате формируется сложная по составу токсичная смесь, обладающая высокой проникающей способностью в дыхательные пути [19–20].

На Рис. 8 представлено схематическое представление структуры твердой частицы в отработавших газах.

Известно, что даже незначительное увеличение образования сажи сразу отражается на визуальных характеристиках выхлопа. Прозрачность резко снижается, появляется характерный черный дым. Это связано с ростом оптической плотности выхлопных газов, которая определяется как концентрацией, так и размером сажевых частиц.

При инструментальных измерениях установлено, что устойчивое визуально заметное дымление возникает при концентрации сажи порядка выше

1,1 г/м³. В таких режимах двигатель уже работает с явными отклонениями – чаще всего это перегрузка, недостаток воздуха или неисправности системы впрыска.

Результаты исследования

О возможности снижения вредных выбросов двигателей внутреннего сгорания горных машин

В настоящее время для нейтрализации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, применяемых на промышленных предприятиях, в основном используются каталитические нейтрализаторы. Каталитический нейтрализатор является важнейшей частью системы выпуска отработавших газов современных двигателей внутреннего сгорания. Его задача – резко сократить количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу.

Каталитические нейтрализаторы обезвреживают токсичные газы посредством химической реакции с использованием специальных драгоценных металлов. Когда топливо сгорает в двигателе и превращается в отработавшие газы, в их составе образуются оксид углерода (СО), углеводороды (СН), то есть несгоревшее топливо, а также оксиды азота (NO_x). Эти вещества вызывают поражение дыхательных путей человека.

Внутри корпуса каталитического нейтрализатора находится керамический или металлический блок, имеющий ячеистую структуру, напоминающую пчелиные соты. Ячейки покрыты специальным слоем, в который добавлены драгоценные металлы, ускоряющие химическую реакцию, но при этом сами не расходующиеся.

Раскаленные отработавшие газы проходят через ячейки, где между металлами происходят два основных процесса. Первый – это восстановление, родий и палладий отбирают кислород у вредных оксидов азота (NO_x), разлагая их на безвредный простой азот (N₂) и кислород (O₂). Второй – это окисление, при этом происходит дожигание несгоревших остатков топлива, к угарному газу (СО) и углеводородам (НС) присоединяется кислород, превращая их в углекислый газ, который не является токсичным газом.

Каталитический нейтрализатор действительно очень эффективен, но его работа не обеспечивает полную очистку по ряду причин. Для эффективной работы катализатора требуется строго определенное соотношение топлива и воздуха. При отклонениях эффективность падает, а при переобогащении возможен перегрев и даже разрушение катализатора. При низком качестве топлива примеси оседают на поверхностях ячеек, блокируя доступ газов к драгоценным металлам. Попадание масла или антифриза также закупоривает соты и покрывает их активным слоем, что приводит к снижению эффективности.

Для повышения эффективности очистки выхлопных газов от твердых частиц, жидких аэрозолей, тяжелых металлов и их оксидов, а также от конденсатов возможно применение электростатического фильтра. Возможность применения электростатического фильтра при каталитической

очистке отработавших газов двигателей внутреннего сгорания приведена на Рис. 9.

Электростатический фильтр работает следующим образом: частицы в потоке газа получают электрический заряд (коронный разряд), заряженные частицы притягиваются к пластинам или стенкам с противоположным зарядом (осадительным электродом). Очищенный газ уходит, а частицы оседают, откуда затем удаляются механически, общий вид электростатического фильтра представлен на Рис. 10.

Выводы.

Применение электростатического фильтра в системе выпуска отработавших газов ДВС дает ряд важных положительных эффектов:

- электрофильтр способен задерживать до 90–99% взвешенных частиц, включая мельчайшие фракции (PM2.5 и PM0.1), которые наиболее опасны для здоровья и плохо задерживаются обычными механическими фильтрами;

- в отличие от плотных сажевых фильтров (DPF) электростатический фильтр создает минимальное противодавление на выпуске, что снижает потери мощности двигателя и практически не ухудшает топливную экономичность;

- электрофильтр эффективно дополняет каталитическую систему: катализатор нейтрализует токсичные газы (CO, CH, NOx), а электрофильтр удаляет сажу, золу и масляный туман. Их совместное применение позволяет достичь высоких экологиче-

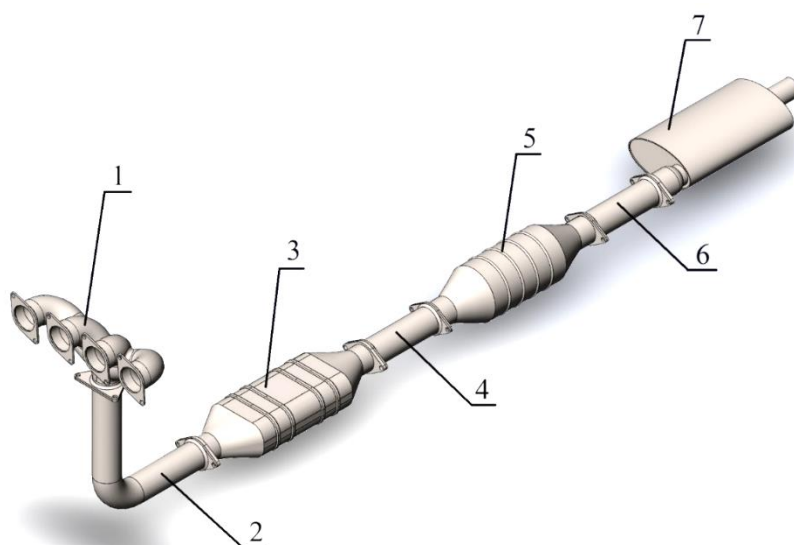


Рис. 9. Возможность применения электростатического фильтра при каталитической очистке отработавших газов двигателей внутреннего сгорания

1 – коллектор, 2, 4, 6 – трубы, 3 – катализатор, 5 – электростатический фильтр, 7 – глушитель.

Fig. 9. Potential application of an electrostatic filter in the catalytic treatment of exhaust gases from internal combustion engines

1 – manifold; 2, 4, 6 – pipes; 3 – catalytic converter; 5 – electrostatic filter; 7 – muffler

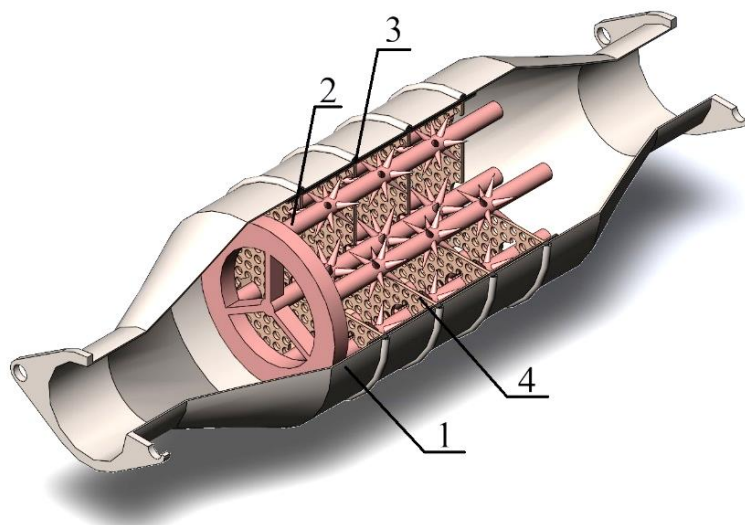


Рис. 10. Электростатический фильтр

1 – корпус, 2 – игольчатый ионизатор, 3 – диэлектрический изолятор тепла, 4 – осадительные электроды

Fig. 10. Electrostatic filter

1 – housing; 2 – needle ionizer; 3 – dielectric heat insulator; 4 – collecting electrodes

ских стандартов (Евро-5, Евро-6 и выше);

- электрофильтр не требует регулярной замены фильтрующих элементов, осажженные частицы удаляются путем регенерации или промывки, что снижает эксплуатационные расходы по сравнению с одноразовыми или требующими частой замены фильтрами;

- особенно актуально для дизельных двигателей и двигателей, работающих в режимах с неполным сгоранием – электрофильтр эффективно улавливает сажу даже при низких температурах газов, когда катализатор еще не вышел на рабочий режим;

- уменьшение выбросов канцерогенных частиц (сажа, тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды) снижает негативное влияние на окружающую среду.

Таким образом, применение электростатического фильтра позволяет одновременно повысить экологичность, сохранить топливную эффективность и снизить эксплуатационные затраты по сравнению с традиционными сажевыми фильтрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Christina N. Burt, Lou Caccetta. Equipment Selection for Surface Mining: A Review // *Interfaces*. 2024. Vol. 44. № (2). Pp. 143–162. DOI: 10.1287/INTE.2013.0732.
2. Каюмов У. Э., Пардаева Ш. С. Влияние пыли на работу двигателя внутреннего сгорания в карьерных самосвалах БелАЗ // *Universum: технические науки*. 2025. Т. 2. № 8 (137). С. 64–69.
3. Pardayeva S., Kayumov U., Kaxharov O. Analysis of factors influencing the increased consumption of diesel fuel by belaz dump trucks in a quarry // *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*. 2025. Т. 10. № 1. С. 237–243.
4. Jo S., Cha J., Park S. Exhaust emission characteristics of stoichiometric combustion applying to diesel particulate filter (DPF) and three-way catalytic converter (TWC) // *Energy*. 2022. Vol. 254. Art. 124196. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124196.
5. Гендлер С. Г., Серегин А. С., Белехов П. А. Исследование влияния эксплуатационных и конструктивных особенностей дизельной техники на загрязнение газами в условиях подземного рудника // *Mining Industry Journal*. 2025. № 4. С. 170–177. DOI: 10.30686/1609 9192 2025 4 170 177.
6. Tucki K., Mruk R., Orynych O., Botwińska K., Gola A., Bączyk A. Toxicity of Exhaust Fumes (CO, NOx) of the Compression-Ignition (Diesel) Engine with the Use of Simulation // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. № 8. Art. 2188. DOI: 10.3390/su11082188.
7. Горелов А. В. Топливные системы и экология дизельных двигателей. Екатеринбург : Уральский университет, 2017. 256 с.
8. Дорж О., Батжаргал Д. Некоторые результаты испытаний по снижению токсичных выбросов дизельных двигателей // *Молодой ученый*. 2023. № 18. С. 36–39.
9. Власов В. М., Кулаков А. Т. Экологические характеристики дизельных двигателей // *Автомобильная промышленность*. 2020. № 5. С. 12–16.
10. Затонский А. П., Мерчалов С. В., Прядкин В. И., Мураткин С. Е. Совершенствование экологических качеств двигателя внутреннего сгорания с использованием очистки выхлопных газов // *Автомобильная и тракторная техника России: пути развития и подготовка кадров: материалы всероссийской научно практической конференции*. Воронеж, 13–14 ноября 2025 г. Воронеж : ВГУЛТ, 2025. С. 44–53. DOI: 10.58168/ATER2025_44 53.
11. Назаров С. В., Лавренчук В. А., Кильянов М. Ю., Мурадов А. В. Особенности обеспечения экологической безопасности при эксплуатации дизельных двигателей и работе с дизельным топливом // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2023. № 6(315). С. 34 41.
12. Кириллов В. Л., Новиков П. Е. Экология и двигатели внутреннего сгорания: учебное пособие для вузов. 2 е изд., перераб. и доп. Москва : Академический проект, 2019. 312 с.
13. Yu H., Zhang X., Li Y. Experimental and numerical studies on fuel-film combustion and wall thermal effect of diesel spray // *Applied Thermal Engineering*. 2023. Vol. 219. Art. 119545. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119545.
14. Марков В. А., Козлов С. И. Топливо и топливоподача много и газодизельных двигателей. Москва : Изд во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 296 с.
15. Логинов А. Н. Анализ процессов сгорания в ДВС при обедненных смесях // *Вестник машиностроения*. 2021. № 9. С. 45–49.
16. Бузиков Ш. В. Прогнозирование выбросов оксидов азота из выхлопных газов дизеля при использовании композитного топлива // *Трактора и сельскохозяйственные машины*. 2022. Т. 89. № 6. С. 377–385.
17. Сидоров А. П. Влияние параметров впрыска топлива на выбросы углеводородов // *Вестник машиностроения*. 2021. № 7. С. 52–57.
18. Фролов Н. В., Кузнецов А. П. Влияние параметров непосредственного впрыска топлива на уровень выбросов оксидов азота и сажи дизельного двигателя // *Техника горных машин и экологическая безопасность*. 2025. № 2(42). С. 56–62. DOI: 10.12345/TGME2025 2 56 62.
19. Хамидов А. Н. Снижение выбросов твердых частиц дизельных двигателей // *Инновационное развитие техники и технологий*. 2022. № 1. С. 60–66.
20. Савельев Е. И., Иванов Д. А., Петров К. Ю. Анализ эффективности каталитической нейтрализации выхлопных газов в ДВС с учетом режимов работы // *Современные проблемы механики и экологии: материалы всероссийской научной конференции*. Казань, 15–17 апреля 2024 г. Казань : Казанский политехнический институт, 2024. С. 98–105.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Джураев Рустам Умарханович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности, Навоийский государственный горно-технологический университет (210100, Респ. Узбекистан, Навоийский район, г. Навои), e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2712-3003>,

Пардаева Шахло Сахибжоновна, доктор философии по техническим наукам (PhD), доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности», Навоийский государственный горно-технологический университет (210100, Респ. Узбекистан, Навоийский район, г. Навои), e-mail: pardayevashahlo33@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4847-6901>,

Каюмов Умиджон Эркинович, старший преподаватель кафедры «Горная электромеханика», Навоийский государственный горно-технологический университет (210100, Респ. Узбекистан, Навоийский район, г. Навои), e-mail: kayumov_umidjon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2147-8973>.

Заявленный вклад авторов:

Джураев Рустам Умарханович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, формулировка выводов, написание текста статьи.

Пардаева Шахло Сахибжоновна – обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных.

Каюмов Умиджон Эркинович – сбор и анализ данных, обработка результатов экспериментов, подготовка графиков и иллюстраций, участие в написании текста статьи, проверка корректности представленных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-73-84

Umidjon E. Kayumov, Rustam U. Djuraev, Shakhlo S. Pardaeva

Navoi State Mining and Technological University

* for correspondence: kayumov_umidjon@mail.ru

REDUCTION OF HARMFUL EMISSIONS FROM INTERNAL COMBUSTION ENGINES OF MINING MACHINERY USING A COMBINED EXHAUST GAS TREATMENT SYSTEM



Article info

Received:

29 March 2026

Accepted for publication:

01 September 2026

Accepted:

15 September 2026

Keywords: internal combustion engine, exhaust system, fuel, exhaust gases, toxicity, soot, electrostatic filter, catalytic converter, environmental impact

Abstract.

The increasing volumes of mineral extraction are accompanied by the growth of mining machinery, leading to a significant rise in pollutant emissions into the atmosphere. In deep open-pit mines with limited air circulation, this results in the accumulation of toxic components in exhaust gases, deterioration of the environmental situation, and increased health risks for personnel. Therefore, reducing harmful emissions from internal combustion engines (ICEs) remains a pressing scientific and technical challenge. This study focuses on the analysis of exhaust gas composition from diesel engines of mining machinery, the mechanisms of toxic component formation, and the evaluation of the effectiveness of modern exhaust gas treatment methods. Special attention is paid to the formation of carbon oxides, nitrogen oxides, hydrocarbons, and particulate matter under various engine operating modes. The results show that the main factors increasing exhaust toxicity are incomplete fuel combustion, uneven air–fuel mixture formation, and the presence of wall quenching zones. Conventional catalytic converters are shown to be effective mainly for gaseous pollutants but have limited capability in capturing solid particles. The study substantiates the feasibility of using a combined exhaust treatment system, including a catalytic converter and an electrostatic filter. It was found that the electrostatic filter can capture 90–99% of fine particulate matter without significantly in-

creasing backpressure. The proposed solution ensures comprehensive reduction of exhaust gas toxicity and improves the environmental performance of mining machinery.

For citation: Kayumov U.E., Djuraev R.U., Pardaeva Sh.S. Reduction of harmful emissions from internal combustion engines of mining machinery using a combined exhaust gas treatment system. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2026; 4(186):73-84 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-73-84, EDN: PFZLED

REFERENCES

1. Christina N. Burt, Lou Caccetta. Equipment Selection for Surface Mining: A Review. *Interfaces*. 2024; 44(2):143-162. DOI: 10.1287/inte.2013.0732.
2. Kayumov U.E., Pardayeva Sh.S. Influence of Dust on the Operation of Internal Combustion Engines in BELAZ Quarry Dump Trucks. *Universum: Technical Sciences*. 2025; 2(8(137)):64-69.
3. Pardayeva S., Kayumov U., Kaxharov O. Analysis of Factors Influencing Increased Diesel Fuel Consumption by BELAZ Dump Trucks in a Quarry. *Scientific and Technical Journal of Namangan Institute of Engineering and Technology*. 2025; 10(1):237-243.
4. Jo S., Cha J., Park S. Exhaust Emission Characteristics of Stoichiometric Combustion Applied to Diesel Particulate Filter (DPF) and Three-Way Catalytic Converter (TWC). *Energy*. 2022; 254. Art. 124196. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124196.
5. Gendler S.G., Seregin A.S., Belekhov P.A. Study of the Influence of Operational and Design Features of Diesel Equipment on Gas Pollution in Underground Mines. *Mining Industry Journal*. 2025; 4:170-177. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-4-170-177.
6. Tucki K., Mruk R., Orynycz O., Botwińska K., Gola A., Bączyk A. Toxicity of Exhaust Fumes (CO, NOx) of the Compression-Ignition (Diesel) Engine Using Simulation. *Sustainability*. 2019; 11(8). Art. 2188. DOI: 10.3390/su11082188.
7. Gorelov A.V. Fuel Systems and Ecology of Diesel Engines. Yekaterinburg: Ural University; 2017. 256 p.
8. Dorzh O., Batjargal D. Some Results of Tests on Reducing Toxic Emissions of Diesel Engines. *Young Scientist*. 2023; 18:36-39.
9. Vlasov V.M., Kulakov A.T. Ecological Characteristics of Diesel Engines. *Automotive Industry*. 2020; 5:12-16.
10. Zatonsky A.P., Merchálov S.V., Pryadkin V.I., Muratkin S.E. Improving Environmental Performance of Internal Combustion Engines Using Exhaust Gas Cleaning. *Automotive and Tractor Technology of Russia: Development Paths and Personnel Training: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Voronezh, November 13–14, 2025. Voronezh: VGULT; 2025. Pp. 44-53. DOI: 10.58168/ATER2025_44-53.
11. Nazarov S.V., Lavrenchuk V.A., Kilyanov M.Yu., Muradov A.V. Features of Ensuring Environmental Safety during Operation of Diesel Engines and Handling Diesel Fuel. *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex*. 2023; 6(315):34-41.
12. Kirillov V.L., Novikov P.E. Ecology and Internal Combustion Engines: Textbook for Universities. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: Academic Project; 2019. 312 p.
13. Yu H., Zhang X., Li Y. Experimental and Numerical Studies on Fuel-Film Combustion and Wall Thermal Effects of Diesel Spray. *Applied Thermal Engineering*. 2023; 219. Art. 119545. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119545.
14. Markov V.A., Kozlov S.I. Fuel and Fuel Supply of Multi-Fuel and Gas-Diesel Engines. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publishing; 2000. 296 p.
15. Loginov A.N. Analysis of Combustion Processes in ICE under Lean Mixtures. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2021; 9:45-49.
16. Buzikov Sh.V. Prediction of Nitrogen Oxides Emissions from Diesel Exhaust Using Composite Fuel. *Tractors and Agricultural Machines*. 2022; 89(6):377–385.
17. Sidorov A.P. Influence of Fuel Injection Parameters on Hydrocarbon Emissions. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2021; 7:52-57.
18. Frolov N.V., Kuznetsov A.P. Influence of Direct Fuel Injection Parameters on Nitrogen Oxides and Soot Emissions of Diesel Engines. *Mining Machinery and Environmental Safety*. 2025; 2(42):56-62. DOI: 10.12345/TGME2025_2_56-62.
19. Hamidov A.N. Reduction of Particulate Emissions from Diesel Engines. *Innovative Development of Technology and Engineering*. 2022; 1:60-66.
20. Saveliev E.I., Ivanov D.A., Petrov K.Yu. Analysis of the Efficiency of Catalytic Neutralization of ICE Exhaust Gases Considering Operating Modes. *Modern Problems of Mechanics and Ecology: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference*. Kazan, April 15–17, 2024. Kazan: Kazan Polytechnic Institute; 2024. Pp. 98-105.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Rustam U, Djuraev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Life Safety, Navoi State Mining and Technological University (210100, Navoi District, Navoi City, Republic of Uzbekistan), e-mail: r.u.djuraev@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2712-3003>

Shakhlo S, Pardayeva, Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Life Safety, Navoi State Mining and Technological University (210100, Navoi District, Navoi City, Republic of Uzbekistan), e-mail: pardayevashahlo33@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4847-6901>

Umidjon E, Kayumov, Senior Lecturer of the Department of Mining Electromechanics, Navoi State Mining and Technological University (210100, Navoi District, Navoi City, Republic of Uzbekistan), e-mail: kayumov_umidjon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2147-8973>

Contribution of the authors:

Rustam U, Djuraev – formulation of the research problem, scientific management, literature review, conceptualization of the study, data collection and analysis, drawing conclusions, manuscript writing.

Shakhlo S, Pardayeva – literature review, conceptualization of the study, data collection and analysis.

Umidjon E, Kayumov – data collection and analysis, processing of experimental results, preparation of graphs and illustrations, participation in manuscript writing, verification of the accuracy of presented data.

Authors have read and approved the final manuscript.

