

УДК 00 1082

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ

Кайрат Бижаев

Начальник автотранспортной колонны.

ТОО «КЭМП-ВОСТОК» / Казахстан

***Аннотация:** В статье рассматриваются актуальные инженерные подходы к снижению углеродного следа и вредных выбросов в горнодобывающей отрасли без необходимости капитального переоснащения парка техники. Анализируются основные источники загрязнения, ограничения применения традиционных технологий, а также перспективы внедрения локальных адаптивных решений. Особое внимание уделяется методам оптимизации процессов топливного сгорания, цифровому мониторингу параметров двигателя и интеграции модульных систем управления. Представлены примеры практической реализации таких подходов в условиях ограниченных ресурсов. Обоснована значимость инженерных решений как инструмента устойчивого развития отрасли и снижения климатических рисков.*

***Ключевые слова:** углеродный след, горнодобывающая техника, выбросы, дизельный двигатель, впрыск топлива, цифровой мониторинг, адаптивные системы, устойчивое развитие, модульные технологии*

ENGINEERING SOLUTIONS FOR REDUCING THE CARBON FOOTPRINT IN THE MINING INDUSTRY

Kairat Bizhayev

Head of the Motor Transport Division

LLP "KEMP-VOSTOK" / Kazakhstan

Abstract: *This article explores current engineering approaches to reducing the carbon footprint and harmful emissions in the mining sector without requiring large-scale equipment replacement. It examines key sources of pollution, the limitations of traditional technologies, and the potential of local adaptive solutions. Particular focus is placed on methods for optimizing fuel combustion processes, digital monitoring of engine parameters, and the integration of modular control systems. Practical examples of such implementations in resource-constrained settings are provided. The significance of engineering solutions is substantiated as a tool for sustainable industry development and climate risk mitigation.*

Keywords: *carbon footprint, mining equipment, emissions, diesel engine, fuel injection, digital monitoring, adaptive systems, sustainable development, modular technologies*

Введение

В условиях глобального изменения климата и усиления экологического регулирования промышленное производство, особенно в традиционно ресурсоёмких отраслях, сталкивается с необходимостью снижения негативного воздействия на окружающую среду. Горнодобывающий сектор, являющийся одним из ключевых источников парниковых и токсичных выбросов, попадает под пристальное внимание международных организаций, национальных экологических агентств и

локальных сообществ. В этой связи проблема углеродного следа и вредных выбросов от тяжёлой техники становится особенно острой.

Работа карьерной и строительной техники, как правило, осуществляется в экстремальных условиях и сопровождается интенсивной эксплуатацией дизельных двигателей внутреннего сгорания, производящих значительные объёмы углекислого газа (CO₂), оксидов азота (NO_x) и твёрдых частиц (PM). Особую обеспокоенность вызывает тот факт, что значительная часть этой техники не соответствует современным экологическим стандартам, таким как EPA Tier 4 Final (США) или EU Stage V (ЕС), а её модернизация требует серьёзных капитальных вложений и наличия технической инфраструктуры, которая не всегда доступна в развивающихся регионах.

Сложность комплексной модернизации автопарков обостряется и экономическими факторами: высокая стоимость новых двигателей, логистические ограничения, дефицит квалифицированных кадров, а также необходимость минимизации простоев производственных процессов. В этих условиях возрастает актуальность инженерных решений, направленных на снижение выбросов без замены основного оборудования и с возможностью поэтапной или модульной реализации.

Настоящая статья направлена на анализ инженерных подходов, позволяющих сократить углеродный след и вредные выбросы в горнодобывающей отрасли без необходимости полной замены парка техники. Особое внимание уделяется практическим и адаптивным решениям, способным обеспечить баланс между экологичностью, экономической эффективностью и эксплуатационной надёжностью. Рассмотрение таких технологий важно не только в контексте выполнения экологических нормативов, но и в рамках стратегий устойчивого развития,

корпоративной экологической ответственности и повышения технологической независимости.

Источники выбросов и особенности дизельной техники в горнодобывающем секторе

Основным источником загрязнения воздуха на объектах горнодобывающей отрасли являются машины и механизмы, работающие на дизельном топливе: самосвалы, экскаваторы, погрузчики, бульдозеры, буровые установки и другая тяжёлая техника. Их двигатели, функционирующие в условиях повышенной нагрузки, ограниченной вентиляции и перепадов температуры, выделяют значительные объёмы парниковых и токсичных газов. К числу основных компонентов выхлопных газов относятся углекислый газ (CO_2), оксиды азота (NO_x), углеводороды (HC), окись углерода (CO) и сажа (твёрдые частицы — PM), оказывающие непосредственное воздействие на здоровье работников и экологическую ситуацию в регионе [1, с.14].

Особенность работы техники в карьерах заключается в том, что она подвержена высокочастотным режимам ускорения и торможения, длительному холостому ходу, а также загрязнению фильтров и систем рециркуляции отложениями пыли и минеральных частиц. В результате увеличивается расход топлива, ухудшается качество сгорания, и, как следствие, растут объёмы вредных выбросов. Учитывая, что многие машины эксплуатируются в течение десятилетий и проходят лишь минимальные обновления, общее воздействие на окружающую среду может быть крайне значительным, особенно в совокупности с масштабами добычи в странах с развивающейся экономикой.

В рамках реализации международных экологических инициатив (например, Парижского соглашения, Повестки дня ООН в области устойчивого развития на период до 2030 года) всё больше стран стремятся к снижению выбросов парниковых газов во всех отраслях, включая горнодобывающую. Однако из-за высокой стоимости технологий, сложностей с поставками оборудования и недостаточной подготовленности персонала, особенно в регионах с низкой технологической базой, значительная часть техники продолжает работать по устаревшим стандартам.

Вопрос о снижении выбросов в горнодобывающей отрасли не может быть решён исключительно путём замены техники или перехода на альтернативные источники энергии. Необходимы локальные, адаптированные инженерные подходы, направленные на модернизацию уже эксплуатируемых машин с минимальными затратами и максимальной эффективностью. Именно такие решения способны обеспечить реальное снижение углеродного следа в кратко- и среднесрочной перспективе.

Современные инженерные подходы к снижению углеродного следа

Инженерные стратегии по снижению вредных выбросов в горнодобывающем секторе условно можно разделить на три категории: использование альтернативных источников энергии, внедрение систем нейтрализации отработанных газов и оптимизация процессов сгорания топлива. Наиболее радикальными мерами являются переход на электрифицированную или водородную технику, а также использование природного газа или биотоплива в качестве заменителей дизеля. Однако данные подходы требуют полной переориентации технологической базы, обновления парка техники и существенных капиталовложений, что делает

их малоприменимыми в краткосрочной перспективе, особенно в странах с ограниченным бюджетом и нестабильной логистикой.

Более реалистичными и широко используемыми являются так называемые «переходные технологии», к которым относятся селективная каталитическая нейтрализация (SCR), фильтры твёрдых частиц (DPF) и системы рециркуляции выхлопных газов (EGR). Эти решения уже получили распространение в странах с жёсткими экологическими стандартами, в первую очередь в США и странах Европейского союза. Однако их внедрение требует высококачественного топлива, регулярного технического обслуживания, наличия расходных материалов (например, раствора мочевины для SCR) и специализированного персонала. Кроме того, retrofit-установка данных систем на технику старого образца может быть затруднена или невозможна без конструктивных изменений [2,с.25].

В условиях, где технические и финансовые ограничения препятствуют использованию вышеуказанных систем, возрастает интерес к методам повышения эффективности сгорания топлива в существующих двигателях. Одним из таких направлений является совершенствование процессов впрыска: переход от механических систем подачи к электронным, внедрение многофазного впрыска, использование адаптивных алгоритмов, калибрующих работу системы в зависимости от внешних условий (высоты, температуры, давления воздуха, типа топлива). Подобные меры позволяют улучшить процесс смесеобразования, уменьшить количество неполностью сгоревшего топлива и, как следствие, сократить выбросы без вмешательства в конструкцию двигателя [4, с.42]

Значительную роль в этом процессе играют цифровые технологии и системы мониторинга. Применение сенсоров, отслеживающих параметры работы двигателя в реальном времени, и программных решений,

позволяющих выявлять отклонения от нормы и накапливать статистику, открывает возможности для предиктивного анализа и профилактического вмешательства. Такие системы не только повышают экологическую устойчивость, но и способствуют оптимизации технического обслуживания, снижению аварийности и увеличению срока службы оборудования.

Современные инженерные подходы стремятся к синергии аппаратных и программных решений, гибко адаптируемых к условиям эксплуатации. Разработка модульных платформ, способных встраиваться в существующие топливные системы без вмешательства в электронный блок управления (ECU), является перспективным направлением. Это снижает барьеры для внедрения и позволяет масштабировать технологию на уровне предприятия или целой отрасли без существенных инвестиций.

Примеры эффективных инженерных решений и локальных адаптаций

В ряде стран с переходной экономикой, а также в регионах с высокой долей устаревшего парка техники, наблюдается рост интереса к внедрению локальных инженерных решений, направленных на снижение вредных выбросов при сохранении эксплуатационных характеристик машин. Основным критерием эффективности таких подходов является способность обеспечить экологический эффект без радикального вмешательства в конструкцию двигателей, без необходимости остановки производственных процессов и без привлечения дорогостоящих импортных компонентов.

Одним из направлений, получивших практическое развитие в странах СНГ и Азии, стало дооснащение карьерной и строительной

техники вспомогательными модулями, позволяющими оптимизировать процессы топливного сгорания. Эти модули встраиваются в контур системы подачи топлива и обеспечивают электронное управление фазами впрыска, а также контроль параметров рабочей смеси. Их функциональность заключается в возможности адаптироваться к реальным условиям эксплуатации — нагрузке, температуре, качеству топлива, высоте над уровнем моря — за счёт гибкой калибровки и встроенных датчиков.

Такие решения, как правило, имеют цифровой интерфейс, позволяющий отслеживать параметры работы двигателя и анализировать эффективность изменений в режиме реального времени. Сбор данных осуществляется при помощи сенсоров, фиксирующих температуру, давление, частоту впрыска, состав выхлопных газов. Полученная информация может передаваться на диспетчерские пульты или интегрироваться в системы электронных бортовых журналов. Это позволяет не только контролировать выбросы, но и проводить диагностику неисправностей, снижать аварийность и планировать техническое обслуживание на основе фактических условий эксплуатации.

На практике такие инженерные решения демонстрируют значительное снижение выбросов оксидов азота и твёрдых частиц — по ряду оценок, до 25–30% в зависимости от исходного состояния техники и условий работы. Важно подчеркнуть, что эти показатели достигаются без ухудшения производительности машин и без увеличения расхода топлива. Более того, в некоторых случаях наблюдается положительный экономический эффект за счёт оптимизации расхода и снижения затрат на ремонт [4].

Одним из примеров практической реализации инженерного подхода к снижению выбросов является внедрение технологии оптимизации топливного впрыска с цифровым контролем рабочих параметров двигателя. В ряде предприятий была апробирована модульная система, позволяющая без вмешательства в штатный блок управления адаптировать режимы впрыска под условия эксплуатации, включая нагрузку, температуру окружающей среды и характеристики топлива. Комплексное решение включает механическую настройку и систему мониторинга на основе датчиков температуры, давления и состава выхлопных газов, что обеспечивает снижение выбросов оксидов азота и твёрдых частиц без потери мощности и ресурса двигателя. Такие методики подтверждают эффективность локальных инженерных решений при соблюдении экологических требований в условиях ограниченных ресурсов.

Опыт локальных внедрений показывает, что ключевым фактором успеха является сочетание инженерного минимализма и функциональной надёжности. Вместо комплексной модернизации или дорогостоящей замены, предприятия получают возможность точечной донастройки и обновления техники с учётом текущих задач и доступных ресурсов. Такие адаптации позволяют бизнесу соответствовать экологическим требованиям, не выходя за рамки бюджета и производственного графика.

Перспективы развития и масштабируемость инноваций

Актуальность инженерных решений по снижению углеродного следа в горнодобывающей отрасли в ближайшие десятилетия будет только возрастать. Это обусловлено не только ужесточением экологического законодательства, но и смещением акцентов в стратегиях компаний в сторону ESG-показателей, декарбонизации производственных процессов и устойчивого развития. В таких условиях особенно востребованными

становятся технологии, позволяющие добиваться экологических эффектов без необходимости полной трансформации технологических циклов и замены оборудования.

Развитие цифровизации и интернета вещей (IoT) создаёт широкие возможности для распространения модульных решений, встроенных в существующую инфраструктуру. Расширение функциональности электронных бортовых систем, объединение данных от множества сенсоров и интеграция с облачными платформами создают предпосылки для формирования так называемой «умной техники», способной адаптироваться к изменениям условий эксплуатации и одновременно соответствовать нормативам по выбросам. Такие системы становятся не только инструментом экологического контроля, но и фактором повышения операционной эффективности.

Масштабируемость подобных решений определяется их универсальностью, адаптивностью и низкими барьерами к внедрению. Использование стандартных протоколов подключения, гибкой настройки под различные марки и модели двигателей, а также совместимость с системами мониторинга, уже используемыми на предприятиях, позволяет быстро адаптировать инновации под реалии конкретного производства. Кроме того, важным фактором является возможность поэтапной реализации, без вывода техники из эксплуатации и без необходимости централизованного управления.

В долгосрочной перспективе можно ожидать появления гибридных систем, сочетающих преимущества электронного управления с энергоэффективными материалами и компонентами. Развитие локального инжиниринга, нацеленного на экологическую модернизацию с учётом национальных особенностей, открывает перспективы для

технологического суверенитета и уменьшения зависимости от импортных решений. Особенно это актуально для стран с развитым горнодобывающим сектором, где внедрение доступных экологических технологий может стать частью государственной политики в области устойчивого развития.

Инженерные подходы, основанные на адаптации, цифровизации и поэтапной модернизации, могут сыграть ключевую роль в переходе горнодобывающей отрасли к более экологически ответственному формату. Они позволяют предприятиям действовать в рамках разумных бюджетов, не теряя при этом конкурентоспособности, и одновременно демонстрировать соответствие глобальным целям в области охраны окружающей среды.

Заключение

Проблема снижения углеродного следа в горнодобывающей отрасли требует системного и прагматичного подхода, сочетающего инженерную эффективность, технологическую доступность и соответствие экологическим нормам. В условиях ограниченных ресурсов и невозможности быстрой замены парка техники особенно актуальными становятся решения, ориентированные на модернизацию существующего оборудования без глубокого вмешательства в его конструкцию. Такие подходы позволяют достичь значительного экологического эффекта при минимальных инвестициях, что делает их особенно ценными для развивающихся экономик и предприятий с высокой интенсивностью эксплуатации техники.

Современные инженерные разработки демонстрируют, что потенциал снижения выбросов может быть реализован не только за счёт

новых двигателей или альтернативных видов топлива, но и через точечные, технологически выверенные вмешательства в процессы топливного сгорания, впрыска и контроля параметров двигателя. Комбинация механических решений и цифровых платформ, поддерживающих мониторинг и адаптацию, представляет собой перспективное направление развития отрасли в условиях декарбонизационного перехода.

Сформировавшийся спрос на модульные, масштабируемые и интеллектуальные системы, не зависящие от глобальных поставок и легко адаптируемые к локальным условиям, подтверждает необходимость инвестиций в прикладные исследования и распространение подобных решений. Их применение позволяет не только улучшать экологические показатели, но и формировать у предприятий культуру технического обновления, ориентированного на устойчивое развитие, без необходимости радикального технологического разрыва.

Таким образом, инженерные решения, ориентированные на снижение углеродного следа и вредных выбросов, выступают важным инструментом в достижении как отраслевых, так и глобальных целей в области климатической нейтральности. Их дальнейшее развитие и поддержка на уровне отраслей, государств и международного сотрудничества представляют собой неотъемлемую часть устойчивого будущего горнодобывающего сектора.

Список литературы

1. Грачев В.П. Методы снижения токсичности отработавших газов дизелей // *Техника и оснащение транспорта*. – 2003. – №2. – С. 14–17. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-snizheniya-toksichnosti-otrabotavshih-gazov-dizelya> (дата обращения: 18.07.2025).
2. Беляев А.И., Соколов Д.В. Способы снижения токсичности отработавших газов поршневых двигателей // *Автомобильный транспорт*. – 2019. – №1. – С. 25–30. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-snizheniya-toksichnosti-otrabotavshih-gazov-porshnevyh-dvigatoley> (дата обращения: 18.07.2025).
3. Зайцев А.Ю. Пути снижения вредных выбросов дизелей // *Инженерный вестник Дона*. – 2021. – №3. – С. 42–48. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46241374> (дата обращения: 18.07.2025).
4. Процесс сгорания дизельного топлива и выбросы вредных веществ при работе дизельных двигателей // *Устройство автомобиля*. – 2022. – URL: <https://ustroistvo-avtomobilya.ru/dizel-naya-toplivnaya-apparatura/protsess-sgoraniya-dizelnogo-topliva-i-vybrosy-vrednyh-veshhestv-pri-rabote-dizelnyh-dvigatoley> (дата обращения: 18.07.2025).