

В.О. Гутаревич /к.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

К.А. Рябко /к.т.н./, Е.В. Рябко

ГОО ВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (Донецк)

ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ДИЗЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

В горных выработках при использовании двигателей внутреннего сгорания необходимая энергия вырабатывается за счет сжигания дизельного топлива. В процессе сжигания топлива выделяются продукты сгорания, содержащие значительное количество вредных веществ. Количество вредных веществ в отработавших газах дизельных двигателей шахтных локомотивов строго регламентируется. Приведены предельно допустимые концентрации вредных веществ в подземных выработках. Рассмотрены проблемы и направления совершенствования экологических характеристик горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой. Определены основные способы снижения эмиссии вредных веществ с отработавшими газами.

Ключевые слова: *горно-транспортная машина, силовая дизельная установка, дизельное топливо, отработавшие газы, предельно допустимые концентрации, вредные вещества, экологические показатели.*

Постановка проблемы

Производственная деятельность горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой оказывает воздействие на окружающую среду при всех видах добычи полезных ископаемых. В горных выработках при использовании двигателей внутреннего сгорания необходимая энергия вырабатывается за счет сжигания дизельного топлива. В процессе сжигания топлива выделяются продукты сгорания, содержащие значительное количество вредных веществ. Основными токсичными компонентами отработавших газов силовых дизельных установок являются окись углерода CO и оксиды азота NO и NO_x. Оксиды азота представляют наибольшую опасность, относительная токсичность CO=1, оксида азота NO₂=41,1 [1].

Применение дизельных локомотивов в горных выработках обусловлено рядом особенностей эксплуатации. Для подземной горной выработки характерны замкнутость пространства и выхлопные газы силовой дизельной установки, которые необходимо разряжать за счет подачи большого количества воздуха. Расход воздуха, который требуется для проветривания горной выработки в шахтах Донбасса и России, в 2,5-4 раза выше, чем за рубежом [2].

Согласно ряду нормативных документов, количество вредных веществ в отработавших газах строго регламентируется, также особые требования предъявляются к конструкции силовой установки горно-транспортной машины.

На основании вышеизложенного особую актуальность представляют исследования, направленные на совершенствование экологических характеристик горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой путем снижения токсичности отработавших газов применительно для угольных шахт.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ технической литературы показывает, что в настоящее время силовые дизельные установки находят все большее применение среди горно-транспортных машин, которые используются на шахтных локомотивах, карьерных тепловозах, автосамосвалах и экскаваторах, подвесных монорельсовых дорогах [3-6]. Основными поставщиками локомотивов для горнодобывающей промышленности являются ОАО «Дружковский машиностроительный завод», ЗАО ПКФ «Амплитуда», ООП НПП «Энергия», ОАО «Александровский машиностроительный завод», Ясногорский машиностроительный завод; международные компании Ferrit (Чехия), Becker (Германия), Sharf (Германия) [7-11].

Несмотря на значительный объем исследований в области создания и повышения эффективности работы силовых дизельных установок горно-транспортных машин, обоснования параметров и режимам работы уделено недостаточное внимание. Также необходимо учитывать тяжелые условия эксплуатации силовой дизель-

ной установки горно-транспортной машины и влияние множества факторов на выброс токсичных веществ с отработавшими газами дизельных двигателей. Данные факторы можно выделить в две основные подгруппы: конструкционные и эксплуатационные [12]. Эксплуатационные факторы в большей степени оказывают влияние на содержание вредных веществ в отработавших газах.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование проблем и направлений снижения концентрации вредных выбросов с отработавшими газами дизельных локомотивов в атмосферу подземных горных выработок.

Основной материал исследования

Горно-транспортные машины с силовой дизельной установкой должны соответствовать требованиям, предъявляемым к оборудованию в рудничном взрывозащищенном исполнении. На транспортных машинах с дизельным приводом должны устанавливаться малотоксичные взрывозащищенные дизельные двигатели. Для привода должны использоваться взрывозащищенные четырехтактные дизельные двигатели с двухступенчатой камерой сгорания и минимально возможным количеством выделяемых при работе газов [13]. Кроме того, нормами безопасности на транспортные машины с дизельным приводом для угольных шахт РД 05-311-99, рекомендуется при конструировании машин отдавать предпочтение дизельным двигателям с отключением части цилиндров (то есть тем конструкциям двигателя и топливной аппаратуры, которые на холостом ходу и при низкой нагрузке обеспечивают работу только части цилиндров в целях достижения меньшего объема выхлопных газов и их меньшей токсичности).

Воздух в действующих подземных выработках при работе горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой не должен содержать вредных веществ больше предельно допустимых концентраций, в том числе суммарных оксидов азота (в пересчете на NO_2) – более 5 мг/м^3 ($0,00025 \%$, $2,5 \text{ ppm}$ по объему) и диоксида азота NO_2 – 2 мг/м^3 ($0,0001 \%$, 1 ppm по объему), оксида углерода – более 20 мг/м^3 ($0,0017 \%$, 17 ppm по объему). В выработки и на участки, по которым проходят маршруты движения горно-транспортных машин с дизельной установкой, должен подаваться свежий воздух в количестве, обеспечивающем разбавление вредных компонентов выхлопных газов до ПДК, но не менее 5 куб. м/мин на 1 л.с. номинальной

мощности дизельных двигателей. В шахтах допускается эксплуатация дизельных двигателей, в неразбавленных выхлопных газах которых на любом допустимом режиме после газоочистки концентрация оксида углерода не превышает $0,08 \%$ (800 ppm) и оксидов азота в пересчете на NO_2 – $0,07 \%$ (700 ppm) по объему [14].

В связи с вышеизложенным, дизелевозы оборудуются сложными техническими системами очистки выхлопных газов, также применяются методы их охлаждения и разжижения. Анализ методов и путей снижения экологического воздействия дизелей на окружающую среду горных выработок показал, что в настоящее время основными являются нижеперечисленные направления.

Работа на обедненной смеси. Большинство дизелевозов работают на топливовоздушной смеси с высоким коэффициентом избытка воздуха (отношение количества воздуха к топливу находится в данных пределах $15:1 - 20:1$). Такой метод позволяет снизить эмиссию токсичных веществ с продуктами сгорания, но существенно снижает к.п.д. силовой дизельной установки горно-транспортной машины (далее СДУ ГТМ).

Изменение угла опережения впрыска топлива (УОВТ). Величина установленного угла опережения впрыска существенно влияет на токсичность отработавших газов, расход топлива и шумность работы дизеля. Изменением угла можно добиться снижения вредных веществ в отработавших газах, уменьшение УОВТ на $4-5^\circ$ от стандартного приводит к снижению концентрации CO до 35% , а увеличение – к росту концентрации до 20% . Эффективность данного мероприятия существенно зависит от режима работы: уменьшение УОВТ приводит к снижению концентрации CO при работе дизеля горно-транспортной машины в диапазоне малых нагрузок и, наоборот, к увеличению – при работе дизеля в области номинальных нагрузок. Применение такого способа требует модернизации СДУ ГТМ специальным устройством, позволяющим автоматически менять УОВТ в зависимости от нагрузки.

Использование рециркуляции отработавших газов. Данный способ подразумевает снижение доли свободного кислорода в свежем заряде цилиндра, что приводит к уменьшению температуры и скорости сгорания топлива. Снижение данных показателей ухудшает условия образования NO , также понижается выбрасываемая масса отработавших газов на величину перепускаемых. Недостатком количественного изменения свежего заряда является негативное влияние на технико-экономические показатели дизеля горно-

транспортной машины. При излишнем перепуске отработавших газов увеличивается расход топлива с одновременным падением эффективной мощности дизеля. Соответственно, количество перепускаемых газов для каждой марки силовой установки подбирается индивидуально, исходя из условий минимального ухудшения технико-экономических показателей дизелей и режимов работы. В целом рециркуляцию предпочтительно применять на горно-транспортных машинах, у которых преобладают режимы холостого хода и малые нагрузки. Рассмотренный способ практически нереализуем на СДУ ГТМ подземных выработок. Рециркуляцию отработавших газов целесообразно применять на горно-транспортных машинах с силовой дизельной установкой при карьерных работах.

Применение различных устройств, предназначенных для снижения токсичности отработавших газов путем восстановления NO_x и использования полученного кислорода для дожигания CO и несгоревших углеводородов. Несмотря на сложность и относительно большую стоимость, этот метод нашел широкое распространение на горно-транспортных машинах, в первую очередь на подземных дизельных локомотивах. Параллельно с каталитическими

нейтрализаторами применяется система охлаждения и увлажнения отработавших газов, приведенная на рисунке 1 [11].

Применение электрофизических методов очистки газов. Принцип электрофизической очистки заключается в воздействии электроразрядной энергии на струю отработавших газов, вследствие чего происходит существенное снижение эмиссии CO и NO_x . Также возможно применение электрофильтра-нейтрализатора вместо серийного глушителя [15]. Данный способ весьма перспективен, но требует глубоких исследований возможности его применения на дизельных горно-транспортных машинах в подземных выработках.

Отключение части цилиндров при работе дизельного подземного локомотива на малых нагрузках. Данное мероприятие подразумевает оборудование и разработку дизельных двигателей для рудничных дизелевозов с системой управления цилиндрами. Система позволяет отключать часть цилиндров при работе на холостом ходу или режимах с малой нагрузкой (стоянка в тупике, ожидание погрузки/разгрузки, движение по уклону). Применение такого способа позволит значительно снизить расход топлива и эмиссию вредных веществ с отработавшими газами.

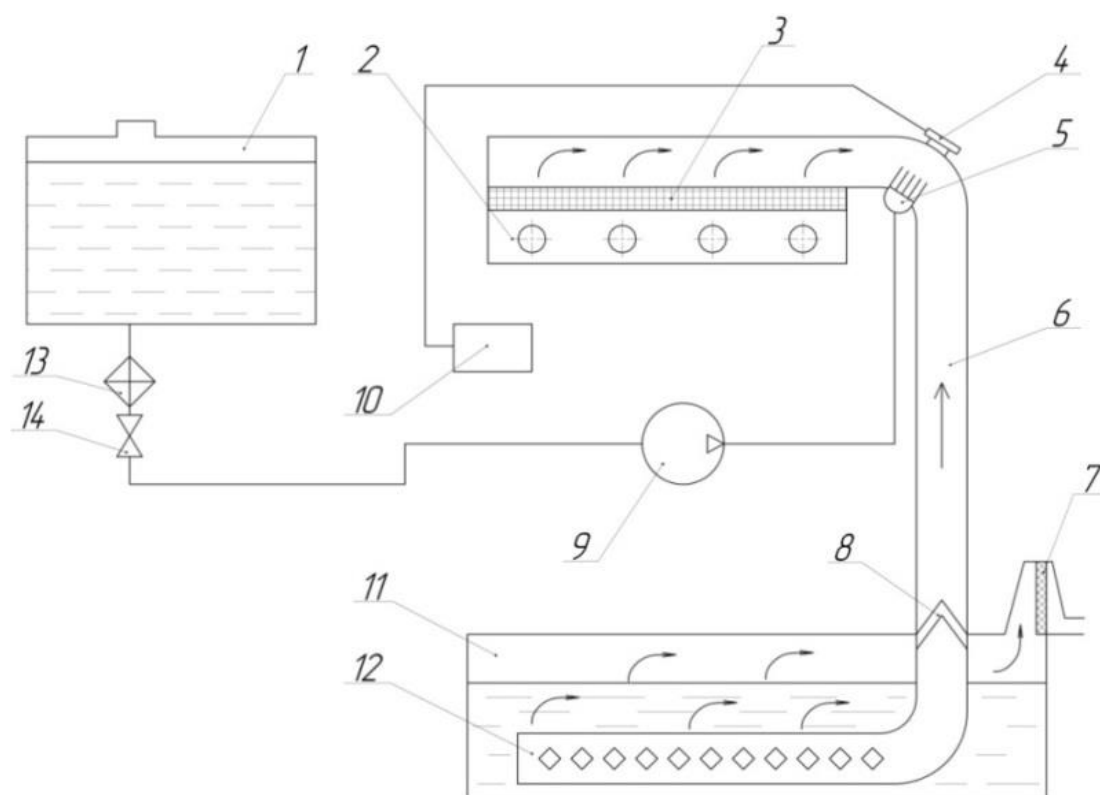


Рис. 1. Схема очистки и охлаждения выхлопных газов [11]:

- 1 – водяной бак; 2 – выхлопной коллектор; 3 – каталитический нейтрализатор; 4 – датчик;
- 5 – форсунка; 6 – вертикальная труба; 7 – пламегасительные решетки; 8 – клапан;
- 9 – водяной оросительный насос; 10 – устройство аварийной остановки; 11 – кондиционер;
- 12 – горизонтальная труба; 13 – клапан; 14 – вентиль

Применение химических добавок к топливу (присадок), водотопливных эмульсий и подача воды во впускной коллектор [16-18]. Эффективность применения присадок и водотопливных эмульсий многократно подтверждалась различными исследованиями. Их применение улучшает выходные параметры силовых дизельных установок, существенно снижает эмиссию вредных веществ в отработавших газах. Применение присадок не требует дополнительной аппаратуры и легко реализуемо в условиях экипажировки СДУ ГТМ.

Использование альтернативных низкотоксичных видов топлив (диметилового эфира, природного или сжиженного газа, топливных элементов). В качестве дизельного топлива можно использовать диметиловый эфир [19]. Это топливо может кардинально решить проблему использования дизельных двигателей в подземных условиях. Для его применения требуется разработка дополнительной топливной аппаратуры наряду со штатной для серийных двигателей. Диметиловый эфир CH_3OCH_3 – экологическое топливо нового поколения, которое не содержит серу, эмиссия оксидов азота с выхлопными газами до 80 % меньше, чем у нефтяных топлив. Цетановое число диметилового дизеля более 55, у нефтяного – до 53. Основным недостатком применения CH_3OCH_3 в качестве топлива для дизельных горно-транспортных машин является его недоступность и низкая температура вспышки: -41°C .

Одним из способов снижения токсичности отработавших газов и экономии дизельного топлива является *применение газодизелей* – двигателей внутреннего сгорания с двухтопливной системой питания: дизельное топливо – газ. Принцип работы газодизеля заключается в уменьшении количества подаваемого в цилиндры дизельного топлива до 40 %, а во впускной ресивер вместе с воздухом подается до 40 % природного или сжиженного газа, которые до впуска в цилиндр образуют гомогенную топливовоздушную смесь. Развиваемая мощность остается на том же уровне, что и при работе на дизельном цикле. Сгорание топлива в цилиндрах происходит более равномерно, дымность отработавших газов снижается до 50 %. Данный способ хорошо зарекомендовал себя на автомобильных дизельных двигателях. Также известен ряд исследований, посвященных данному вопросу [20-22]. Основной проблемой является разработка комплекса мероприятий, который бы обеспечил безопасность использования природного газа в качестве топлива на СДУ ГТМ в подземных выработках.

Главный конкурент жидких углеводородных топлив – *водород*, его применение характеризу-

ется высокими энергетическими и экологическими характеристиками. В Российской Федерации и за рубежом уже эксплуатируются транспортные средства, использующие водород в жидком виде или в составе топливных элементов [23]. Рабочий процесс дизельно-водородного двигателя характеризуется увеличением степени сгорания топливовоздушной смеси, что существенно снижает эмиссию вредных веществ: CO – в 9 раз, NO_x – в 7 раз, CH – в 2 раза.

Существенными недостатками использования водорода в качестве моторного топлива остаются его дороговизна, сложность производства, водородное охрупчивание сталей. Смесь водорода с воздухом горюча и взрывоопасна, что, в свою очередь, усложняет применение H_2 в качестве топлива на СДУ ГТМ. Применение водородно-кислородных топливных элементов с непосредственным преобразованием энергии химической реакции в электрическую расширяет возможности применения водорода в качестве источника энергии.

Выводы

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что универсального способа снижения токсичности отработавших газов, удовлетворяющего экологическим требованиям, для дизельных горно-транспортных машин нет. Если использовать только методы воздействия на рабочий процесс дизеля, которые снижают эмиссию NO_x , то можно получить увеличение выбросов других токсичных компонентов. Применение средств очистки и охлаждения отработавших газов требует постоянного обслуживания каталитических нейтрализаторов, пламегасительных решеток, кондиционеров.

В качестве рекомендаций по совершенствованию экологических характеристик горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой можно выделить следующее:

- при разработке комплекса устройств нейтрализации или очистки отработавших газов для горных транспортных средств с силовой дизельной установкой необходимо учитывать тип дизеля, режим его работы, тип топлива и состав его примесей, назначение тяговой единицы;

- наиболее приемлемыми методами снижения вредных компонентов отработавших газов шахтных дизельных локомотивов являются: нейтрализаторы с катализаторами дожигания углеводородов; применение альтернативных низкотоксичных видов топлив; переход на газодизельный цикл; использование топливных присадок; отключение части цилиндров при работе дизеля на малых нагрузках.

Учет данных рекомендаций позволит существенно снизить эмиссию вредных веществ дизельными тяговыми средствами в подземной горной выработке.

Список литературы

1. Рябко, К.А. Воздействие двигателей внутреннего сгорания на окружающую среду / К.А. Рябко, Е.В. Рябко // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – 2016. – № 41. – С. 55-60.
2. Шахтный подземный транспорт: Справочное издание. – В 2-х т. – Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. / Ю.Ф. Бутт и др. // Под общ. ред. Б.А. Грядущего. – Т.1. – Донецк: ВИК, 2009. – 481 с.
3. Тарасов, В.М. Технология работы дизель-гидравлических локомотивов и навесного оборудования в горных выработках / В.М. Тарасов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 2. – С. 155-165.
4. Becker, F. Integriertes Konzept zur Kollisionsvermeidung zwischen Personen und Fahrzeugen im Untertagebergbau / F. Becker, S. Becker // Glückauf. – 2011. – Vol.147. Iss.1/2. – P. 20-24.
5. Becker, F. Modernisierung der Logistikkette im polnischen Verbundbergwerk «Borynia-Zofiówka» durch leistungsstarke Transportmittel und ein integriertes Steuerungs- und Kommunikationssystem / F. Becker // Mining+geo. – 2012. – No. 2. – P. 224-230.
6. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств / В.А. Будишевский, А.Я. Грудачев, В.О. Гутаревич [и др.]; под ред. В.П. Кондрахина. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 216 с.
7. Мохельник, П. Чешские взрывозащищенные рудничные дизелевозы / П. Мохельник, П. Коварж // Горная промышленность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/transport/1705-cheshskievzryvozashchishchennye-rudnichnye-dizelevozy>
8. Гнайдинг, Э. Презентация фирмы «СМТ Шарф» и новые разработки. Дальнейшее расширение производственной программы / Э. Гнайдинг // Глюкауф. – 2011. – № 1. – С. 24-27.
9. Презентация шахтного подвешного дизельного локомотива BEVEX 80R // Уголь. – 2010. – № 12. – С. 32-33.
10. Применение тягача мощностью 148 кВт в системах транспорта фирмы Becker-Warkop в горной промышленности // Уголь. – 2010. – № 8. – С. 58-61.
11. Стендовые испытания подвешной монорельсовой дороги 2ДМД с дизельным приводом / В. В. Бухановский [и др.] // Шахтный и карьерный транспорт / Под ред. А.О. Спиваковского. – Москва, 1981. – Вып. 7. – С. 189-193.
12. Рябко, Е.В. Анализ факторов, влияющих на надежность дизельных силовых установок карьерных и рудничных локомотивов / Е.В. Рябко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 3 (9). – С. 44-51.
13. Чубаров, Л.А. Нормы безопасности на транспортные машины с дизельным приводом для угольных шахт / Л.А. Чубаров, В.П. Степаненко, И.П. Ремизов и др. // РД-05-311-99. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 г. № 71.
14. Чубаров, Л. А. Технические требования по безопасной эксплуатации транспортных машин с дизельным приводом в угольных шахтах / Л.А. Чубаров, В.П. Степаненко, И.П. Ремизов и др. // РД-05-312-99. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 г. № 71.
15. Белоусов, В.А. Исследование газодинамического сопротивления электрофилтра-нейтрализатора отработавших газов дизельного двигателя / В.А. Белоусов, А.Н. Карташевич, А.В. Кравец // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 3. – С.126-129.
16. Мельник, А.Ю. Влияние воды на характеристики дизельного топлива / А.Ю. Мельник, С.Н. Миникаева, С.Б. Павлов, Х.Э. Харлампиди // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 24. – С. 123-125.
17. Деревяго, И. Эколого-экономическая оценка эффективности использования топливных добавок // Вестник АГТУ. – 2016. – №1 (61). – С. 28-33.
18. Джихинто, Г.А. Использование альтернативных топлив как способ снижения уровня токсичности выбросов судовых двигателей внутреннего сгорания / Г.А. Джихинто // Вестник АГТУ. – 2007. – № 6. – С. 146-149.
19. Степаненко, В.П. Перспективы конвертации горных дизельных машин на газовое топливо / В.П. Степаненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 5. – С. 190-197.
20. Загородских, Б.П. Результаты экологических исследований трактора К-700А, работающего по газодизельному циклу / Б.П. Загородских, В.В. Володин, Е.В. Бебенин // Известия НВ АУК. – 2014. – № 1 (33). – С. 193-196.
21. Савастенко, А.А. Особенности работы топ-

ливной аппаратуры газодизеля с внутренним смесеобразованием / А.А. Савастенко, С.А. Казаков, В.В. Харитонов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2004. – № 2. – С. 40-43.

22. Беляев, С. В. Перспективы применения водородных топливных элементов на автомоби-

лях / С.В. Беляев // Resour. Technol. – 2005. – № 5. – С. 6-9.

23. Шугаев, О.В. Обоснование выбора и аргументация использования водородного топливного элемента для автомобиля / О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская // Вестник СибГИУ. – 2016. – № 3 (17). – С. 19-22.

V.O. Gutarevich /Cand.Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

К.А. Ryabko /Cand.Sci. (Eng.)/, E.V. Ryabko

Donetsk Institute of Railway Transport (Donetsk)

PROBLEMS AND DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF MINE TRANSPORT WITH A DIESEL PLANT

Background. *The problems and directions of improvement of ecological characteristics of mine transport with diesel power plant considered. The main ways to reduce the emission of harmful substances with exhaust gas determined.*

Materials and /or methods. *The use of diesel locomotives in mining is conditioned by a number of features of operation. Underground mining is characterized by closed space and exhaust gases of the diesel power plant, which must be discharged by supplying a large amount of air. The air in the underground workings at work of mine transport machines with a power diesel plant must not contain harmful substances more than maximum permissible concentrations, including total oxides of nitrogen (in terms of NO₂) – more than 5 mg/m³ (0.00025 %, 2.5 ppm in volume) and nitrogen dioxide NO₂ – 2 mg/m³ (0.0001 %, 1 ppm in volume), carbon monoxide-more than 20 mg/m³ (0.0017 %, 17 ppm in volume). Diesel locomotives are equipped with complex technical systems for purification of exhaust gas using methods of their cooling and liquefaction.*

Results. *There is no universal way to reduce the toxicity of exhaust gas that meets environmental requirements for diesel mine transport machines. When using methods to influence the working process of the diesel engine, it is possible to increase emissions of other toxic components. It is recommended to take into account the type of diesel, its mode of operation, the type of fuel and the composition of its impurities, the purpose of the traction unit when developing a set of devices for neutralizing or purification of exhaust gases for mine transport with a diesel power plant.*

Conclusion. *The most acceptable methods for reducing the harmful components of exhaust gases of mine diesel locomotives are neutralizers with catalysts for hydrocarbon afterburning; the use of alternative low-toxic fuels; the transition to a gas-diesel cycle; the use of fuel additives; the shutdown of part of the cylinders when diesel is operated at low loads. Taking into account the above recommendations will reduce the emission of harmful substances by diesel traction means in underground mining.*

Keywords: *mine transport, diesel power plant, diesel fuel, exhaust gas, maximum allowable concentration, harmful substances, environmental performance.*

Сведения об авторах

В.О. Гутаревич

SPIN-код: 6436-6484

Телефон: +380 (62) 301-08-54

Эл. почта: viktor.gutarevich@mail.ru

Е.В. Рябко

SPIN-код: 9216-7256

Телефон: +380 (62) 319-21-76

Эл. почта: evgeniya.ryabko@gmail.com

К.А. Рябко

SPIN-код: 7192-6321

Телефон: +380 (62) 319-04-37

Эл. почта: railroader@yandex.ru

Статья поступила 14.02.2018 г.

© В.О. Гутаревич, К.А. Рябко, Е.В. Рябко, 2018

Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко