

Снижение выбросов чёрного углерода карьерными самосвалами

Н.М. Холод, д.э.н., научный сотрудник Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (США)

М. Эванс, старший научный сотрудник Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории (США)

В.С. Малышев, к.т.н., профессор, зав. кафедрой энергетики и транспорта ФГБОУ ВПО «Мурманский государственный технический университет»

Внедорожная техника является значимым источником выбросов отработанных газов. Карьерные самосвалы, благодаря своим размерам и мощности, а также вследствие режимов работы занимают львиную долю среди выбросов внедорожной техники. В карьерах на перемещение руды приходится более 70% потребляемого топлива. По мере роста масштаба горных разработок роль карьерных самосвалов постоянно растет. В частности, по данным компании Parker Bay, количество эксплуатируемых в мире карьерных самосвалов увеличилось с 38,5 тыс. единиц в начале 2013 г. до 43,0 тыс. к октябрю 2014 г. В России также растет число карьерных самосвалов. Так, крупнейший поставщик карьерной техники БЕЛАЗ ежегодно продает в России около 800 самосвалов и это число постоянно возрастает. В 2012 г. в карьерах России работало около 12,5 тыс. карьерных самосвалов.

Развитие горнорудного производства в России ставит перед предприятиями ряд проблемных вопросов. Во-первых, горнорудные компании нуждаются в более эффективной и надежной технике. Во-вторых, возрастающие во многих странах экологические нормы требуют радикального снижения объёмов и токсичности выбросов отработанных газов. Снижение выбросов важно и для прилегающих к предприятиям муниципальных образований, потому что выбросы дизельной техники, включая сажевые частицы, или так называемый «чёрный углерод» (Black Carbon, BC), негативно сказываются на здоровье населения. Используя более «чистые» двигатели, компании избегают значительных экологических платежей, кроме того, существенно улучшаются условия работы в карьерах, улучшается видимость, удается снизить риски и количество аварий.

Воздействие чёрного углерода на здоровье людей и климат

Установлено, что карьерная техника, и особенно карьерные самосвалы, являются значимым источником выбросов чёрного углерода. Собственно чёрный углерод – это продукт неполного сгорания дизельного топлива, основной компонент взвешенных частиц (Particulate Matter, PM). Даже самые крупные из них (размером до 2,5 мкм (PM_{2,5}) в 30 раз меньше толщины среднего человеческого волоса. Взвешенные частицы попадают в легкие человека и уже не выводятся из них. Установлено, что эти мелкие частицы создают серьезные проблемы здоровью населения, вызывая сердечно-сосудистые заболевания и преждевременную смерть. В июне 2012 г. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) классифициро-



вала выхлопы от дизельных двигателей как канцерогенные. В соответствии с выводами ВОЗ воздействие PM_{2,5} сокращает продолжительность жизни людей в среднем на 8,6 месяцев.

Чёрный углерод является третьим по силе фактором, вызывающим глобальные изменения климата, вслед за углекислым газом и метаном. Особенно активно чёрный углерод воздействует на зону Арктики. Оседая на снег и лед, он уменьшает их отражательную способность (альбедо). В результате усиливается абсорбция солнечного излучения, возрастает температура воздуха, интенсифицируется процесс таяния снега и льда. Эти обстоятельства делают Арктику особенно чувствительной к выбросам чёрного углерода.

Стандарты выбросов, принятые в мире и в России

Многие страны приняли стандарты выбросов, которые устанавливают максимально допустимые концентрации вредных веществ в выхлопных газах. Первые ограничения выбросов взвешенных веществ от внедорожных транспортных средств были введены в США в 1994 г. (Tier 1 Emission Standards). В конце 1990-х годов Евросоюз также разработал свою систему стандартов (Stage).

Большинство стран следуют примеру США и Евросоюза и устанавливают свои экологические стандарты для внедорожных транспортных средств. Например, Канада полностью скопировала систему стандартов США в 1999 г., Китай установил стандарты, соответствующие требованиям нормативов Tier 2 в 2009 г., Австралия и Индия приняли стандарт Tier 2 в 2011 г.

Большинство видов современных карьерных самосвалов оборудуются дизельными двигателями мощностью более 560 кВт. Первый стандарт для двигателей такой мощности был введен в США в 2000 г. (табл. 1). Абсолютное большинство двигателей карьерных самосвалов имеют маркировку стандартов Tier, разработанных Агентством по охране окру-

Табл. 1 Стандарты США по выбросу взвешенных частиц (PM) для внедорожной техники с дизельными двигателями мощностью более 560 кВт

Класс токсичности выбросов (год введения стандарта)	Коэффициент выбросов взвешенных частиц (PM), г/кВт·ч
Tier 1 (2000)	0,54
Tier 2 (2006)	0,20
Tier 3 добровольный (2006)	0,12
Tier 4 промежуточный (2011)	0,10
Tier 4 окончательный (2015)	0,04

жающей среды США (EPA).

В России первые стандарты выбросов для новых автомобилей ввели в 2006 г., однако до сих пор отсутствуют стандарты для внедорожной техники. Отсутствие таких стандартов позволяет заказчикам приобретать транспортные средства, не удовлетворяющие даже нормативам Tier 1, то есть без систем нейтрализации выхлопных газов.

Как известно, основной поставщик карьерных самосвалов в Россию – БЕЛАЗ. Большинство поставляемых самосвалов БЕЛАЗ оборудованы двигателями Cummins. По информации фирмы Cummins, лишь 12% из поставляемых в Россию БЕЛАЗов соответствуют нормативам Tier 1, а 88% не оснащены системами ограничения выбросов. Небольшое количество эксплуатирующихся в России карьерных самосвалов Caterpillar и Komatsu соответствуют нормативам Tier 1 и Tier 2.

Влияние ограничения выбросов на топливную экономичность и стоимость двигателей

Введенные в конце 1990-х годов нормативы Tier 1 привели к некоторому росту расхода топлива (3–5%) и увеличению на 2–3% стоимости оборудования [1]. Однако технические характеристики двигателей совершенствовались с развитием технологий. При переходе на стандарт Tier 2 при одновременном снижении выбросов эксплуатирующие организации стали получать лучшую топливную экономичность (удельный расход топлива) автопарков. Например, двигатели Cummins QSK19, соответствующие Tier 2, показывают лучшую топливную экономичность по сравнению с Tier 1 при одновременном увеличении мощности и крутящего момента, а также увеличение ресурса до капремонта на 30%. Двигатели Cummins Tier 4 обеспечивают снижение расхода топлива для двигателя на 7% по сравнению с двигателями Tier 2. Двигатель Cummins QSK50 при уменьшенном расходе топлива и сниженном расходе мочевины имеет экономию по эксплуатационным затратам в 5%. Фирма MTU докладывает о экономии топлива двигателей Tier 4 по сравнению с предыдущими моделями на 5%.

Конечно, ужесточение стандартов выбросов приводит к некоторому удорожанию производства новых двигателей. По данным EPA, введение стандарта Tier 4 сопровождается ростом стоимости оборудования на 1–3%.

Нам удалось собрать информацию о стоимости и топливной экономичности эксплуатируемой в России карьерной техники. Наиболее полная информация была получена от фирмы Komatsu, поставляющей карьерные самосвалы грузоподъемностью 180 и 220 т. Эти самосвалы оборудованы двигателями Tier 2 мощностью соответственно 1500 и 1900 кВт. Несколько лет назад Komatsu поставляла двигатели Tier 0, поэтому достаточно просто провести их сравнение. Двигатели Tier 2 на 6% дороже по сравнению с двигателями Tier 0. Стоимость двигателей составляет примерно 15% от стоимости самосвала, потому удорожание двигателей приводит к удорожанию са-

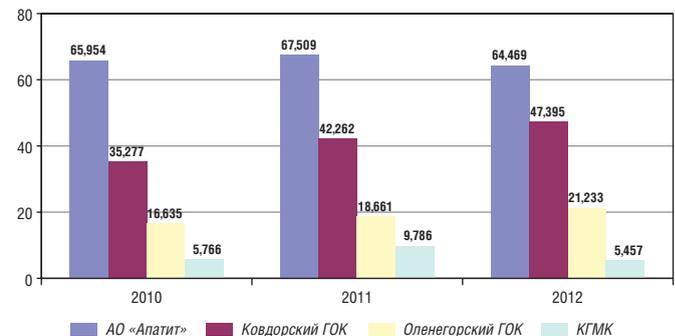
мосвала в целом лишь на 1–1,5%. Что очень важно, новые двигатели Komatsu дают 12%-ую экономию топлива.

Снижение удельного потребления топлива и повышение эксплуатационных характеристик являются серьезным преимуществом новых двигателей. Благодаря этим факторам горнорудные компании получили серьезные аргументы в пользу перехода на более экономичные и экологически чистые двигатели в карьерном автопарке.

Горнорудная промышленность Мурманской области

В Мурманской области на долю горнорудной промышленности приходится 40% промышленного производства. В регионе добывается 100% российского апатита, 45% никеля и 11% железной руды.

Вместе с тем горнорудная промышленность Мурманской области, представленная крупнейшими горнорудными компаниями – ООО «Апатит», Ковдорский ГОК, Оленегорский ГОК и Кольская горно-металлургическая компания (КГМК), остаётся и крупнейшим потребителем дизельного топлива. В соответствии с официальной статистикой в 2012 г. эти компании потребили 139 тыс. т дизельного топлива (рисунок).



Потребление дизельного топлива (тыс. т) крупнейшими горнодобывающими компаниями Мурманской области в период 2010–2012 гг. (по данным годовых отчетов компаний)

В карьерах Мурманской области доминирует техника двух компаний: БЕЛАЗ и Caterpillar. Официальных данных об общем числе карьерных самосвалов нет, но, по нашим оценкам, здесь эксплуатируется не менее 250 самосвалов. У горнорудных компаний области существуют планы по расширению производства, что даёт основания ожидать увеличения числа единиц тяжёлой карьерной техники в ближайшее время.

Белорусский производитель БЕЛАЗ поставляет в Мурманскую область преимущественно самосвалы грузоподъемностью 130–136 т, с двигателями мощностью от 780 до 1200 кВт. БЕЛАЗы оборудуются в основном двигателями Cummins (QSK 19-С, QST 30-С, QSK 45-С и КТА 38-С, КТА 50С), а также двигателями фирм MTU и Detroit Diesel. Наиболее популярной в Мурманской области является модель БЕЛАЗ-75131 грузоподъемностью 130–136 тонн, оснащенная двигателем Cummins КТА 50-С.

Главным преимуществом продукции БЕЛАЗ является меньшая стоимость карьерных самосвалов. В последнее время, однако, покупатели все чаще стали приобретать на замену старых БЕЛАЗов модели Caterpillar 777F, 785С, а также Unit Rig MT 3300АС и Komatsu HD785.

Выбросы чёрного углерода в карьерах Мурманской области

По результатам проведенной нами инвентаризации выбро-

сов дизельными двигателями в Мурманской области выяснилось, что именно горная отрасль является крупнейшим источником чёрного углерода. Естественно, вклад каждой из указанных компаний различается и зависит от количества потребляемого топлива, состава парка техники, режимов ее использования, характеристик карьеров и т.д.

Существуют два метода расчетной оценки выбросов чёрного углерода. Первый метод базируется на использовании информации по расходу дизельного топлива. Коэффициент выбросов $PM_{2,5}$ для двигателей внедорожной техники класса Tier 0 (без ограничения токсичных выбросов) составляет 3,551 г/кг топлива, для двигателей, соответствующих Tier 1 – 0,967 г/кг топлива, при этом соотношение $BC/PM_{2,5}$ составляет 0,62 [2]. По нашим оценкам, ежегодный объём выбросов чёрного углерода карьерной техникой всех горнодобывающих компаний Мурманской области составляет 280 т.

Второй метод оценки требует информации о мощности двигателя, количестве часов работы, распределении режимов работы, соответствии двигателя конкретному стандарту Tier. Для примера рассчитаем выбросы чёрного углерода от двух типичных карьерных самосвалов.

Карьерные самосвалы в среднем работают 6300 ч/год. Характерными режимами распределения времени в наряде являются: время в пути груженого самосвала, время в пути порожнего самосвала, время ожидания погрузки/разгрузки и время простоев. Распределение времени между указанными режимами зависит от характеристик карьеров (глубина, плечо перевозки, качество дорог, погрузочной техники и др.). В частности, для рудника Восточный компании «Апатит» это соотношение составляет 32:28:40 [3]. Распределение режимов работы самосвалов определяет расход топлива и, как результат, объёмы выбросов чёрного углерода.

Результаты расчетной оценки выбросов чёрного углерода для двух наиболее популярных моделей БЕЛАЗов в карьерах Мурманской области приведены в табл. 2. Расчеты сделаны исходя из предположения об оснащении самосвалов двигателями различных стандартов Tier.

Табл. 2 Расчет выбросов чёрного углерода (BC) для карьерных самосвалов с различными по классу Tier двигателями

Параметры и показатели	БЕЛАЗ-75145			БЕЛАЗ-75131		
	Tier-0	Tier -1	Tier-2	Tier-0	Tier -1	Tier-2
Мощность двигателя, кВт	895	895	895	1193	1193	1193
Наработка в год, ч	6300	6300	6300	6300	6300	6300
Время простоя, %	40	40	40	40	40	40
Доля времени в пути порожнего самосвала, %	28	28	28	28	28	28
Доля времени в пути груженого самосвала, %	32	32	32	32	32	32
Время простоя, ч	2520	2520	2520	2520	2520	2520
Время движения порожнего самосвала, ч	1764	1764	1764	1764	1764	1764
Время движения груженого самосвала, ч	2016	2016	2016	2016	2016	2016
Мощность двигателя во время простоя (25% от номинальной), кВт	224	224	224	298	298	298
Мощность двигателя порожнего самосвала (40% от номинальной), кВт	358	358	358	477	477	477
Мощность двигателя груженого самосвала (85% от номинальной), кВт	761	761	761	1014	1014	1014
Коэффициент выбросов PM , г/кВт·ч	1,03	0,54	0,2	1,03	0,54	0,2
Выбросы PM , простои, кг/год	581	304	113	774	406	150
Выбросы PM , порожнего, кг/год	650	341	126	867	455	168
PM , груженого, кг/год	1580	828	307	2106	1104	409
Суммарные годовые выбросы PM , кг	2811	1474	546	3747	1964	728
Соотношение BC/PM	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62	0,62
Выбросы BC , кг/год	1743	914	338	2323	1218	451

Как видно из табл. 2, замена двигателей на более высокие стандарты Tier резко снижает выбросы взвешенных частиц и чёрного углерода. По данным ЕРА, экономические выгоды общества от снижения выбросов PM на одну тонну составляют в США от 230 до 880 тыс. долларов в год [4]. Поэтому внедрение экологических стандартов происходит во всех странах мира. Внедрение стандартов выбросов от внедорожной техники позволит существенно снизить выбросы в России.

Возможные варианты снижения выбросов чёрного углерода карьерными самосвалами

Двигатели карьерных самосвалов имеют относительно небольшой срок службы. Так, двигатели Cummins KTA-38 заменяют после 18–24 тыс. часов работы, двигатели KTA-38 – после 20–26 тыс. часов, для двигателей Caterpillar этот интервал составляет 18–22 тыс. часов, а для MTU – 20 тыс. часов. Так как годовая наработка карьерного самосвала составляет 6000–7000 часов, замена/капитальный ремонт двигателей должен проводиться каждые 3–4 года. Это дает возможность выбирать различные варианты возможного снижения выбросов чёрного углерода.

1. Замена двигателей

Восстановление двигателя капитальным ремонтом остаётся самым распространенным, но наименее рациональным методом обновления. Дело в том, что стоимость капитального ремонта составляет порядка 70% от стоимости нового двигателя. При этом его экономичность не улучшается, не уменьшаются и выбросы чёрного углерода, а ресурс отремонтированного двигателя до следующего капремонта обычно не превышает 80% от начального. Нецелесообразна также и простая замена отработавшего ресурс двигателя на новый двигатель того же экологического класса.

На наш взгляд, гораздо эффективнее будет замена старого двигателя на качественно новый. Компания, например, может инвестировать средства на приобретение и установку двигателя класса Tier 2 вместо старого, соответствующего классу Tier 0. В этом случае можно ожидать увеличения топливной экономичности на 5–15%, увеличения ресурса до очередного технического обслуживания, роста продолжительности межремонтного периода, резкого снижения выбросов чёрного углерода, при относительно небольшом росте стоимости двигателя.

По нашим данным, потребление топлива наиболее популярных в Мурманской области моделей карьерных самосвалов составляет: для самосвала БЕЛАЗ-75131 – 41 т, САТ 785С – 43 т и БЕЛАЗ-75145 – 23 т топлива в месяц. Это значит, что для БЕЛАЗ-75131 замена двигателя класса Tier 0 на двигатель класса Tier 2 обеспечит экономию на 5–15%, то есть уменьшит на 25–75 т расход дизельного топлива в год, а значит реально окупит замену двигателя за 3 года эксплуатации.

2. Замена карьерных самосвалов

Срок службы карьерных самосвалов также ограничен. Так, жизненный цикл БЕЛАЗа составляет 5–7 лет, Caterpillar –

9–12 лет. Оба крупнейших поставщика карьерной техники в Россию способны выпускать автомобили класса Tier 4 (например, новый БЕЛАЗ-75574 с двигателем MTU12V2000), однако до сих пор в Россию поставляется техника в лучшем случае класса Tier 2. Нам представляется более дальновидным и перспективным переход на поставку техники как минимум класса Tier 2, как более экономичной, эффективной и с большим ресурсом. Высшие стандарты Tier также обеспечивают существенное снижение выбросов взвешенных частиц и чёрного углерода.

3. Оснащение карьерных самосвалов системами нейтрализации отработанных газов

Известно достаточно много технологий, обеспечивающих снижение токсичности выбросов дизельными двигателями. Главными из них являются каталитический окислитель для дизелей (DOC), рециркуляция выхлопных газов (EGR), селективный каталитический восстановитель (SCR), пассивные и активные сажевые фильтры (P-DPF и A-DPF). Все эти технологии используются в России для автодорожной техники. Эти технологии также можно применять и для мощных двигателей внедорожной техники.

К сожалению, в России такого рода модернизации экономически нецелесообразны, так как действующие нормативы платы за выбросы крайне низки и их снижение в результате модернизации не способно компенсировать значительные затраты на оснащение системами нейтрализации. Однако компании могут принять такое решение исходя из соображений обеспечения чистоты воздуха в карьере, что влияет на работу техники и здоровье людей, а также по экологическим мотивам.

Выводы

Выполненная инвентаризация выбросов чёрного углерода от дизельных источников в Мурманской области показала, что карьерная техника является крупнейшим источником выбросов чёрного углерода. Действие экологических стандартов в России не распространяется на карьерную технику, и это приводит к преимущественному использованию в карьерах техники с двигателями экологического класса Tier 0.

Наш анализ показал, что замена используемых двигателей класса Tier 0 (без регулирования выбросов) на двигатели Tier 2 – Tier 4 не только позволит кардинально снизить выбросы чёрного углерода и тем самым улучшить условия работы в карьерах области, но и обеспечит экономическую выгоду заказчику, повысит надежность и срок службы двигателей.

Снижение выбросов чёрного углерода карьерной техникой в регионе и стране в целом принесет выгоду населению прилегающих городов и поселков, обеспечит как локальный, так и глобальный экологический эффект.

Источники информации:

1. EPA, 1994. *Regulatory Impact Analysis and Regulatory Support Document. Control of Air Pollution; Determination of Significance for Nonroad Sources and Emission Standards for New Nonroad Compression-Ignition Engines at or Above 37 Kilowatts (50 Horsepower)*. U. S. Environmental Protection Agency, Ann Arbor, MI.; EPA, 1998b. *Regulatory Announcement. New Emission Standards for Nonroad Diesel Engines*. U. S. Environmental Protection Agency, Ann Arbor, Michigan.
2. EEA, 2013. *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook — 2013*. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. Available at <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-non-road-mobile-sources> (Table 3.2.)
3. Никитин К.В., Звонарь А.Ю., Козлов Д.Е., Маркитан С.В. Результаты промышленного внедрения автоматизированной системы диспетчеризации на Восточном руднике АОА «Апатит» // *Горная Промышленность*, №4 (104)/2012.
4. EPA, 2012. *Report to Congress on Black Carbon*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C. Available at <http://www.epa.gov/blackcarbon/>