

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЕЗЕРВНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК МЕТРОПОЛИТЕНА

*В.О. Сайданов, д.т.н., И.В. Слесаренко, С.Н. Езерский;
Военный инженерно-технический университет*

Рассмотрены актуальные вопросы обеспечения экологической безопасности резервных дизельных энергетических установок (ДЭУ) метрополитена, отличающихся специфическими условиями и режимами эксплуатации. На основе выполненного сравнительного анализа существующих способов очистки отработавших газов ДЭУ предлагается способ их жидкостной очистки.

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного способа нейтрализации ОГ был разработан и создан опытно-экспериментальный стенд, являющийся масштабированной моделью дизельной энергетической установки ДГ-4000 со штатной системой газораспределения большой протяженности.

Распыливание воды в выпускном тракте с удельным расходом воды, равным 1 л/кВт·ч, позволяет снизить дымность ОГ на 40–60 % и сократить общие затраты на эксплуатацию энергетических объектов, расположенных на природоохранной территории.

Системы электроснабжения метрополитена предусматривают применение резервных источников электроэнергии, выполняемых на основе поршневых двигателей внутреннего сгорания. Наряду с высокой топливной экономичностью [1] существующие дизельные двигатели характеризуются не самыми высокими экологическими показателями: удельными средневзвешенными выбросами вредных веществ с отработавшими газами (ОГ), нормируемыми по ГОСТ Р 51249-99, и дымностью ОГ, нормируемой по ГОСТ Р 51250-99.

Известно, что ОГ дизелей представляют собой гетерогенную смесь веществ с разнообразными физическими и химическими свойствами и на 99–99,98 % состоят из продуктов полного сгорания топлива и воздуха. Остальные 0,02–1 % содержат более 300 веществ, большинство из которых токсично, и часть из них отличается характерным запахом [2, 8]. Основная масса вредных компонентов ОГ (до 90 %) газообразная и состоит из оксида углерода, оксида азота и се-

ры, углеводородов. Остальная часть вредных веществ выделяется в виде твердой и жидкой фаз. Твердая фаза представлена в основном в виде сажи и в меньшей степени минеральными частицами из воздуха (пыли) и топлива (зольные составляющие), а также металлическими частицами, образовавшимися в результате износа пар трения. Основу жидкой фазы оставляют исходные углеводороды топлива и масла [1].

Согласно действующему природоохранному законодательству РФ, содержание вредных веществ в зоне рассеивания шлейфа ОГ стационарной установки не должно превышать предельно допустимой концентрации (ПДК) вредных веществ в атмосфере населенных пунктов. Для выполнения этого требования современные промышленные дизели должны быть оборудованы средствами очистки газов, работающими с эффективностью, удовлетворяющей экологическим требованиям (не ниже 90 %). Однако на практике штатные системы очистки ОГ утрачивают проектную эффективность очистки в процессе длительной эксплуатации.

Величина выбросов вредных веществ резервными дизельными энергетическими установками (ДЭУ) обуславливается типом, мощностью, техническим состоянием, родом применяемого топлива и многими другими причинами, но прежде всего — режимом работы. «Правила эксплуатации ДЭУ метрополитена» в режиме резервирования предусматривают определенную периодичность плановых пусков двигателей и непрерывную работу на переходных режимах при долевых нагрузках. Работа на таких режимах вызывает нарушение процессов сгорания и как следствие — увеличение выбросов вредных веществ в атмосферу. При этом рекуперативные газохладители в составе выпускных трактов при подобных эксплуатационных режимах активно покрываются отложениями сажи и несгоревшего масла. А как показывает практика, уплотнившиеся в течение срока эксплуатации сажистые отложения в элементах выпускных трактов автономных энергоустановок приводят к авариям и пожарам.

Опасность загрязнения атмосферы отработавшими газами резервных ДЭУ метрополитена

усугубляется вследствие точечного, концентрированного характера выбросов, приводящего к образованию зон активного загрязнения. Это обстоятельство вследствие разрастания городов приобретает все большую значимость. Оголовки вентиляционных шахт систем метрополитена, как источники вредных выбросов, попадают в зону жилой застройки и во время осуществления регламентных пусков дизелей, вызывают справедливые нарекания граждан и привлекают внимание общественных природоохранных организаций.

Анализ установленного оборудования и его срока эксплуатации в системах резервного электропитания метрополитена показывает, что на данных объектах установлены ДЭУ с двухтактными дизелями 1980–1995 годов выпуска. Для дизель-генераторов серийного производства с достаточно длительным периодом эксплуатации экономически обоснованной является разработка только таких способов улучшения экологических показателей работы, которые не требуют конвертации самого двигателя, а предполагают лишь модернизацию систем, обеспечивающих его работу. Наиболее эффективно это достигается при комплексной очистке ОГ за счет применения нейтрализаторов различного типа [6, 7].

Наиболее распространена и достаточно подробно изучена жидкостная нейтрализация ОГ как с использованием «чистой» воды, так и различных растворов в контактных аппаратах самого различного типа. Жидкостная нейтрализация в наиболее простом виде заключается в непосредственном контакте ОГ с водой или каким-либо химическим раствором. При этом водорастворимые компоненты ОГ (альдегиды, окислы серы, высшие окислы азота) нейтрализуются, некоторые газы растворяются в жидкости, а сажевые и другие дисперсные частицы, смолистые вещества улавливаются жидкостью, ослабляется интенсивность запаха ОГ и снижается их температура. При контакте водорастворимых компонентов газов с жидкостью происходит целый ряд реакций, обращающий их в различные кислоты и соли [1, 5].

Но окиды азота и углерода практически не растворимы в воде и общая эффективность поглощения оксидов азота чистой водой не превышает 10–15 % [6]. Более сильными реагентами по сравнению с водой являются растворы щелочей и некоторых солей. Многолетние и разнообразные исследования, проведенные в ВИТУ, убедительно показали высокую реакционную способность растворов NaOH , Na_2CO_3 , Na_2SO_3 , NaHCO_3 при самых различных концентрациях.

Эффективность жидкостной нейтрализации ОГ зависит от скорости химических превращений,

равномерности распределения реагирующих веществ, величины поверхности контакта фаз и коэффициентов диффузии [5].

Для минимизации затрат (при реконструкции существующих систем газовыпуска, направленных на улучшение экологических характеристик резервных ДЭУ метрополитена, главным образом по дымности ОГ) сотрудниками ВИТУ предложен достаточно эффективный способ нейтрализации ОГ. Он основан на жидкостной очистке ОГ путем распыливания при помощи форсунок воды в выпускной тракт с регулированием ее расхода в зависимости от типа двигателя и его нагрузочного режима [10].

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного способа нейтрализации в условиях реального объекта на экспериментальной базе ВИТУ в п. Приветнинское Ленинградской области был создан опытно-экспериментальный стенд, технологическая схема которого представлена на рис. 1.

Экспериментальный стенд являлся масштабированной моделью дизельной энергетической установки ДГ-4000 на базе ДВС 16ДПН 23/2×30 со штатной системой газовыпуска большой протяженности.

В качестве основного объекта исследований использовалась передвижная электростанция ЭСД-30-ВС/230М2 на базе дизеля 4Д10,8/12,7 (ЯАЗ-204).

Система газовыпуска, выполненная с учетом приближенного физического подобия с натурным объектом, конструктивно состоит из начального участка выпускного трубопровода 4, выполненного из стальной трубы $\varnothing 76 \times 3$, протяженностью 5 м, и конечного участка выпускного трубопровода 5, выполненного из стальной трубы $\varnothing 108 \times 5$, протяженностью 15 м. С одной стороны, начальный участок выпускного трубопровода 4 соединен с помощью металлорукава с испытуемым дизелем 1, а с другой, — с ресивером 9. Последний имитирует элементы системы газовыпуска объекта. Перед ресивером в начальный участок выпускного трубопровода установлена форсунка 8 для впрыска воды в поток ОГ. Для подачи и регулирования расхода и давления воды на форсунке 8 последняя трубопроводами соединена со специальной гидропневматической системой, состоящей из баллона сжатого воздуха 6 с вентилем 14 и редуктором 15, гидропневматического резервуара 7 с запорно-регулирующей арматурой 16, 17, 18. В качестве форсунки 8 при проведении исследований использовалась форсунка открытого типа с распылителем типа ВТИ. Ресивер 9 оборудован системой сбора конденсата с баком 10. Конечный участок выпускного трубопровода 5 с одной стороны соединен при помощи метал-

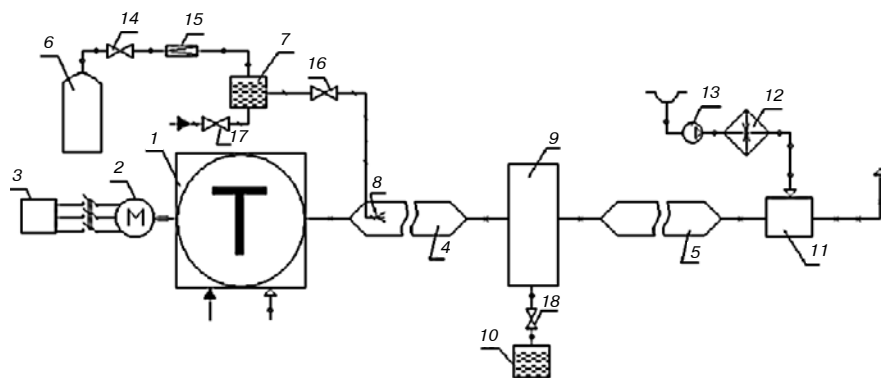


Рис. 1. Технологическая схема экспериментального стенда:

1 — дизель; 2 — генератор; 3 — нагрузочный реостат; 4 — начальный участок выпускного трубопровода; 5 — конечный участок выпускного трубопровода; 6 — баллон сжатого воздуха; 7 — гидropневматический резервуар; 8 — форсунка; 9 — ресивер; 10 — бак; 11 — смешительная емкость; 12 — калорифер; 13 — вентилятор; 14, 16, 17, 18 — запорно-регулирующая арматура; 15 — редуктор

лорукава с ресивером 9, а с другой — со смешительной емкостью 11, которая предназначена для смешения ОГ и атмосферного воздуха. Эта емкость соединена трубопроводом с вентилятором 13, подающим через калорифер 12 атмосферный воздух.

Такое конструктивное исполнение выпускного тракта позволяло поддерживать повышенные значения величины противодавления выпуску $p = 850-1100$ мм вод. ст.

Для измерения относительных содержаний сажи (дымности) и углеводородов в ОГ использовались оптический микропроцессорный дымомер ОМД-21 и оптический газоанализатор ОПТОГАЗ-21.

Контактная нейтрализация ОГ путем распыливания воды осуществлялась непосредственно на начальном участке выпускного трубопровода с помощью центробежной форсунки, устанавливаемой во внутренней его части. При этом происходило охлаждение ОГ при испарении распыливаемой воды, частичное поглощение содержащихся в ОГ вредных веществ и разбавление ОГ парами воды. Процесс очистки ОГ непрерывно контролировался по величинам давления и температуры ОГ (соответственно до и после форсунки). При этом определялось качество и количество конденсата, который образовывался в емкостных элементах тракта. Все измерения по газовому анализу выполнялись в конце тракта выпуска в атмосферу.

На рис. 2 представлены зависимости изменения дымности (N , %) ОГ дизеля 4Д10,8/12,7 от нагрузки при работе без средств снижения дымности и с использованием форсуночного распыливания с расходом воды 27,9 л/ч в условиях имитации реального объекта (по величине противодавления на выпуске).

Из анализа графиков (рис. 2) видно, что применение форсуночного распыливания позволяет снизить дымность ОГ дизеля во всем диапазоне рабочих нагрузок. Причем наибольший эффект снижения дымности ОГ (в 1,5 раза) наблюдается на режиме номинальной мощности, а наименьший (в 1,25 раза) — на режиме холостого хода.

Сложность технологического процесса очистки ОГ и не полный контроль возмущающих факторов потребовали более детального подхода к эксперименту по сравнению с последовательным изучением каж-

дого фактора.

На основе теории планирования эксперимента были приняты два независимых фактора: относительная мощность дизель-генератора ($P_e/P_{ен}$) и расход воды, подаваемой на распыл в форсунку (G). Выходным параметром или параметром оптимизации принята величина дымности ОГ (N). Соответственно, критерий оптимизации — минимальное значение этой величины.

На рис. 3 представлены результаты двухфакторного эксперимента.

Представленная на рис. 3 поверхность отклика двухфакторного эксперимента адекватно описывается следующим уравнением регрессии:

$$N = 54,84 - 45,22P_e/P_{ен} - 0,77G + 23,5(P_e/P_{ен})^2 + 0,24(P_e/P_{ен}) \cdot G + 0,005G^2. \quad (1)$$

Доверительные интервалы переменных уравнения (1) соответствуют масштабу приведенных

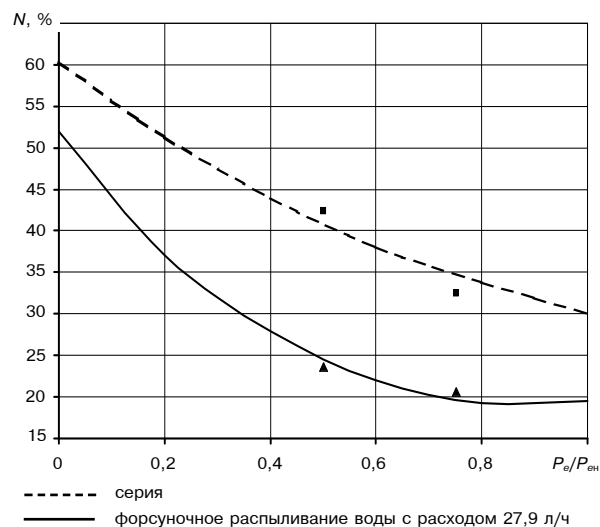


Рис. 2. Зависимости изменения дымности ОГ дизеля 4Д10,8/12,7

на графике (рис. 3) осей и равны: для расхода воды 0–50 кг/ч, для относительной нагрузки 0–1.

Полученная зависимость позволяет оценить рабочий диапазон изменения расхода воды форсункой и оптимальные значения этих расходов для различных нагрузочных режимов. Рабочий диапазон изменения расхода воды установлен в пределах 10–50 кг/ч. При расходах воды менее 6 кг/ч эффект снижения дымности не проявляется. При расходах воды более 24 кг/ч дальнейшее увеличение подачи воды не приводит к адекватному снижению дымности. Средним расходом воды, который обеспечивает снижение дымности на всех нагрузочных режимах, можно (по данным эксперимента) принять расход воды 30 кг/ч, что соответствует удельному расходу воды 1 кг/кВт·ч.

Для достижения наименьших значений дымности во всем диапазоне нагрузочных режимов целесообразно осуществлять регулирование расхода воды в пределах от 0,3 до 1,5 кг/кВт·ч в соответствии с уравнением регрессии.

Дополнительно на экспериментальном стенде осуществлялось разбавление ОГ атмосферным воздухом путем добавления в поток ОГ определенного количества подогретого атмосферного воздуха. При этом воздух подавался с помощью вентилятора, а его температура повышалась с помощью калорифера до температуры ОГ на конечном участке выпускного тракта дизеля, т. е. примерно 90 °С при нагрузке 50 % от номинальной мощности.

Разбавление ОГ атмосферным воздухом проводилось совместно с контактной нейтрализацией ОГ путем форсуночного распыливания воды на режиме $P_e = 0,5P_{ен}$. При этом наблюдалось дополнительное снижение дымности на 10–20 %

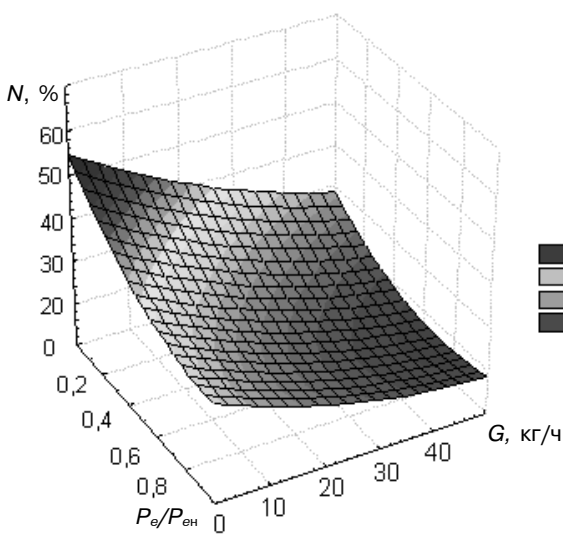


Рис. 3. Зависимость дымности ОГ дизеля 4Д10,8/12,7 от относительной нагрузки и расхода воды

при подаче воздуха, подогретого до температуры 60 °С в количестве примерно 30 % по объему от расхода ОГ.

Выводы

1. Минимизация затрат по улучшению экологических характеристик резервных ДЭУ метрополитена при реконструкции существующих систем газовыпуска может быть выполнена способом нейтрализации ОГ на основе жидкостной очистки ОГ путем распыливания при помощи форсунок воды в выпускном тракте с регулированием ее расхода.

2. Проверка работоспособности и эффективности предложенного способа нейтрализации проводилась на опытно-экспериментальном стенде, являющимся масштабированной моделью дизельной энергетической установки ДГ-4000 на базе ДВС 16ДПН 23/2×30 со штатной системой газовыпуска большой протяженности.

3. Применение форсуночного распыливания воды в выпускной тракт позволяет снизить дымность ОГ на 40–60 %, а на некоторых режимах и более. Средний расход воды, который обеспечивает снижение дымности на всех нагрузочных режимах, соответствует удельному расходу воды 1 л/кВт·ч. Данное техническое решение защищено патентом на изобретение РФ № 2204028 [10].

4. Разбавление ОГ атмосферным воздухом совместно с контактной нейтрализацией ОГ путем форсуночного распыливания позволяет дополнительно снизить дымность ОГ на 10–20 %.

5. Результаты экспериментальных исследований позволяют рекомендовать разработанный способ нейтрализации ОГ и технические средства для его реализации для внедрения при реконструкции систем газовыпуска резервных ДЭУ метрополитена.

Литература

1. Гладков О.А., Лерман Е.Ю. Создание малотоксичных дизелей речного флота. — Л.: Судостроение, 1990. — С. 42–102.
2. ГОСТ Р 50761-95. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Общие требования безопасности.
3. ГОСТ Р 51249-99. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения.
4. ГОСТ Р 51250-99. Дизели судовые, тепловозные и промышленные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения.
5. Капустин А.А., Карабельников С.К. Токсичность ОГ дизелей и пути ее уменьшения. Сборник: «Улучшение эффективных экологических и ресурсных показателей энергетических установок с/х тракторов и автомобилей». — СПб.: 1997. — С. 102–111.
6. Новиков Л.А., Юрченко Э.Н., Шляхтов В.А. Создание установок очистки газов для стационарных

дизелей и испытательных станций // Двигателестроение. — 1995. — № 1–2.

7. Новиков Л.А. Современные и перспективные технологии для организации малотоксичной работы двигателей // Двигателестроение. — 2005. — № 4 — С. 8–15.

8. Мутушев М.А. Экологические свойства газодизельного тракта дизельной электростанции // Двигателестроение. — 1996. — № 1. — С. 24–25.

9. Тошин В.П., Епифанов В.С., Фомин А.А. Снижение выбросов оксидов азота газодизеля путем рециркуляции охлаждаемых отработавших газов // Двигателестроение. — 1998. — № 2. — С. 38–40.

10. Патент №2204028 РФ, МПК F01N3/04. Способ нейтрализации отработавших газов двигателя внутреннего сгорания /Романенко Н.П., Агафонов А.Н., Сайданов В.О., Слесаренко И.В. и др. Б.И. — 2003. — № 13.



21–24 мая 2007 г. в Вене (Австрия), в конгресс-центре Hofburg состоялся очередной 25-й конгресс CIMAC (Conseil International des Machines a Combustion) — Всемирный конгресс по технологиям в области двигателей внутреннего сгорания.

CIMAC был основан в Париже в 1951 г. и объединяет в качестве членов национальные ассоциации, национальные группы и корпорации 24 стран Америки, Европы и Азии.

Очередной конгресс работал в соответствии с двумя программами: технической и выставочной.

Техническая программа включала работу в 14 секциях:

Секция 1. Развитие техники — дизельные двигатели.

Секция 2. Фундаментальные исследования — поршневые двигатели (дизельные и газовые).

Секция 3. Охрана окружающей среды, топлива, сгорание — дизельные двигатели.

Секция 4. Трибология — дизельные двигатели.

Секция 5. Компоненты, развитие технологий — дизельные двигатели.

Секция 6. Системотехника — дизельные двигатели.

Секция 7. Развитие техники — газовые двигатели.

Секция 8. Компоненты, развитие технологии — газовые двигатели.

Секция 9. Турбокомпрессоры.

Секция 10. Развитие техники, фундаментальные исследования газовые турбины.

Секция 11. Компоненты, развитие технологий — газовые турбины.

Секция 12. Комплексные системы — дизельные двигатели, газовые турбины.

Секция 13. Проблемы эксплуатации — двигатели судового назначения.

Секция 14. Проблемы эксплуатации — двигатели наземного назначения.

Таким образом, значительное внимание было уделено тематике дизельных и газовых двигателей судового, тепловозного и стационарного назначения, их развитию, особенностям проектирования и эксплуатации, компонентам и системам, топливам, маслам и охлаждающим жидкостям, проблеме охраны окружающей среды от вредного воздействия выбросов вредных веществ с отработавшими газами, комплексным установкам, системотехнике. Участники конгресса заслушали свыше 140 докладов.

Выставочная программа представляла собой выставку идей, представленных на стендовых плакатах, открытую в дни конгресса. Здесь без ограничения времени представлялась возможность обсудить представленные идеи непосредственно с авторами; были представлены 25 экспозиций по различной тематике.

Данная программа являлась частью технической выставки, занявшей площадь свыше 700 м², на которой были представлены достижения около 40 известных фирм: ABB, «AVL List GMBH», «Chevron», «Deutz Power Systems», «MAN Diesel A/S», «Mitsubishi Heavy Industries», «MTU Friedrichshafen GMBH», «Wartsila Corporation» и др.

По окончании деловой части 25 мая 2007 г. участникам и гостям конгресса была предоставлена возможность посетить австрийские производственные и научные предприятия: «AVL List GMBH», «Hoerbiger Ventilwerke GMBH & Co KG», «Siemens Transportation Systems GMBH», «Lec GMBH», MIBA AG, «Magna GMBH & Co KG».