

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ

И.Ф. Гумеров, к.т.н., Д.Х. Валеев, к.т.н., А.С. Куликов, Р.Х. Хафизов, Е.Р. Борисенков;
 ПАО «КАМАЗ»,
 Н.А. Гатауллин, к.т.н.;
 КНИТУ-КАИ им. Туполева

ПАО «КамАЗ» реализовал проект испытательного стенда, обеспечивающего повышение эффективности исследований экологических показателей двигателей. Показано, что рациональное размещения испытательного оборудования в моторном боксе, применение модулей для кондиционирования воздуха, стабилизация температуры охлаждающей жидкости и смазочного масла способствуют повышению точности определения выбросов вредных веществ и воспроизводимости результатов испытаний двигателей по методикам Правил ЕЭК ООН № 49-05. Приведены результаты работ по выполнению нормативных требований Евро-5. Представлено направление дальнейшего развития исследовательской базы ПАО «КамАЗ».

Введение

В XXI веке прогресс в развитии конструкции высоконагруженных дизельных двигателей (далее двигателей) для тяжелых грузовых автомобилей в значительной мере обусловлен введением жестких законодательных ограничений на выбросы вредных веществ с отработавшими газами [1, 2]. Разработка и создание ведущими зарубежными фирмами (AVL, Horiba и др.) стендового и газоаналитического оборудования для исследовательских, сертификационных и контрольных испытаний создали необходимые условия для серийного и массового производства.

В табл. 1 приведены предельные значения выбросов вредных веществ (ВВВ) с отработавшими газами (ОГ) двигателей, установленные требованиями Правил ЕЭК ООН № 49-04, 49-05, 49-06. Начиная с этапа Евро-4, возрастает сложность вы-

полнения нормативных требований по выбросам оксидов азота (NO_x) и частиц (РТ). На этапах Евро-5 и Евро-6 поиск компромисса между NO_x и РТ становится сверх сложным. Особенности нормирования на этапе Евро-6 являются: пятикратное снижение, в сравнении с Евро-5, предельного значения выбросов NO_x , «прецизионный» норматив на предельное значение РТ = 0,01 г/(кВт·ч), а также дополнительное введение нормирования выбросов количества частиц. В связи с вышеприведенными ограничениями повышение точности и воспроизводимости результатов исследований экологических показателей двигателей при их стендовых испытаниях имеет первостепенное значение.

Общие требования к исследовательскому стенду. Характеристики оборудования и систем измерения выбросов вредных веществ

Еще в 70-е годы прошлого века отечественными и зарубежными специалистами, занимающимися исследованиями двигателей, были сформулированы требования к точности проводимых экспериментов и измерений [3]. В настоящее время мировой опыт в этой области обобщен и стандартизирован в Правилах ЕЭК ООН № 49-05 [4].

Габаритные размеры и объем испытательного бокса в основном связаны с мощностными параметрами двигателей, которые планируется испытывать на стенде. Необходимость создания комфортных условий для оператора и инженера-ис-

Таблица 1

Предельные значения ВВВ с ОГ дизелей по Правилам ЕЭК ООН № 49

Этапы Евро	Испытательные циклы	Оксид углерода (CO)	Углеводороды (HC)	Оксиды азота (NO_x)	Дисперсные частицы (РТ)	Дымность —цикл ELR	Аммиак (NH_3)	Число частиц
Евро-4	ESC	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5	25	—
	ETC	4,0	0,55	3,5	0,03		25	—
Евро-5	ESC	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5	25	—
	ETC	4,0	0,55	2,0	0,03		25	—
Евро-6	WHSC	1,5	0,13	0,40	0,01	—	10	8,0·10 ¹¹
	WHTC	4,0	0,16	0,46	0,01	—	10	6,0·10 ¹¹

ESC — европейский стационарный цикл; WHSC — глобальный стационарный цикл; ETC — европейский переменный цикл; WHTC — глобальный переменный цикл; ELR — европейский нагрузочный цикл

следователя определяют размеры пультового помещения. В частности, имея мощностные характеристики испытываемого двигателя, исходя из уравнения теплового баланса испытательного бокса, достаточно точно определяются характеристики системы вентиляции (приточная и вытяжная) [5]. Кроме технологических требований испытательный стенд двигателей должен удовлетворять действующим современным требованиям: строительным, техники безопасности, пожарной безопасности и промышленной санитарии.

На рис. 1 представлена схема стенда для исследовательских испытаний двигателей. Проект стенда разработан на КамАЗе и реализован на испытательной станции НТЦ. Объем испытательного бокса составляет 370 м³.

Программное обеспечение системы STARS в автоматизированном режиме позволяет проводить испытания двигателей по циклам Правил ЕЭК ООН № 49-05 (ESC, ETC, ELR); 96-02, а также по методикам Правил № 24-03 и 85-00.

Необходимые условия для повышения точности определения ВВВ на стенде обеспечены за счет рационального размещения оборудования, применения «коротких» пробоотборных линий, установки в отдельных вспомогательных помещениях, изолированно от вибраций и теплового воздействия, всего комплекса газоаналитического оборудования, систем измерения расхода топлива и дымности ОГ.

Испытательный стенд на основе модульного принципа укомплектован:

- тормозным устройством на базе асинхронной машины Dynas 3 460 фирмы «Schenck» (Германия) со следующими техническими характеристиками: номинальная мощность на режимах тормоза/двигателя — 464/445 кВт; максимальная/номинальная частота вращения вала — 5010/1625 об/мин, точность измерения частоты вращения — 0,1 %; максимальный крутящий момент на режимах тормоза/двигателя — 2600/2490 Н·м, точность измерения крутящего момента — 0,2 %; номинальное напряжение асин-

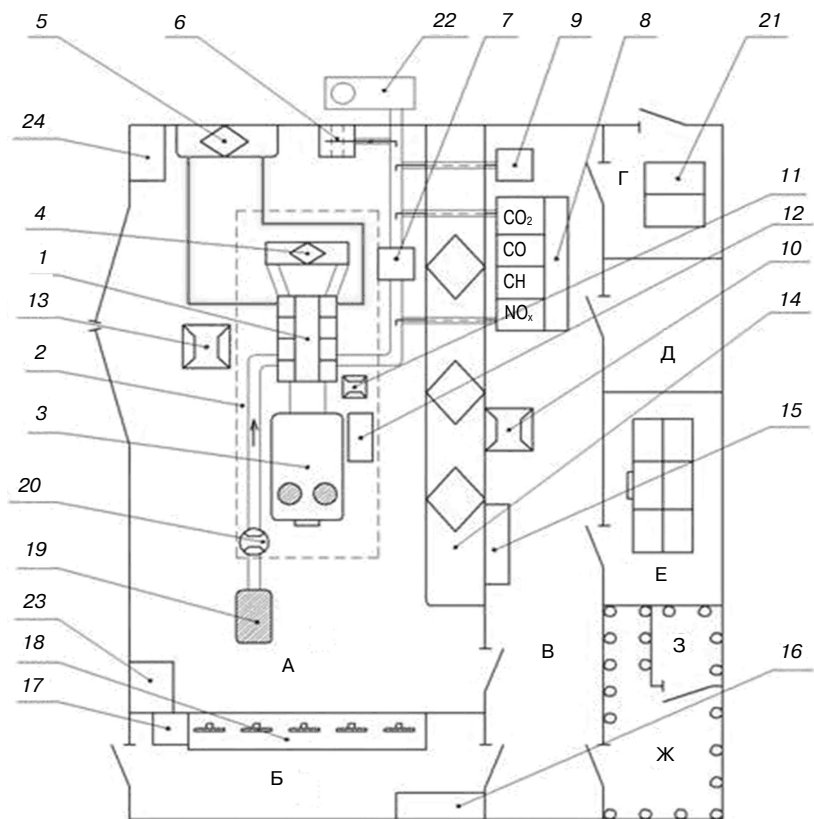


Рис. 1. Схема испытательного стенда двигателей, расположения его основных помещений, оборудования и измерительной аппаратуры:

А — испытательный бокс; Б — пультовое помещение; В — помещение для измерительного оборудования; Г — помещение для обеспечения топливом; Д — противопожарная система стенда; Е — система управления тормозным устройством; Ж — помещение для поверочных газовых смесей; 3 — отделение для баллонов с калибровочными газами.

1 — испытываемый двигатель; 2 — установочная плита; 3 — тормозное устройство на базе асинхронного двигателя; 4 — система кондиционирования наддувочного воздуха; 5 — система кондиционирования охлаждающей жидкости двигателя; 6 — микротоннель для измерения выбросов твердых частиц с отработавшими газами; 7 — нейтрализатор отработавших газов; 8 — газоанализатор для измерения выбросов вредных веществ до и после нейтрализатора; 9 — дымомер; 10 — расходомер топлива; 11 — модуль измерительный для давлений и температур; 12 — расходомер картерных газов; 13 — расходомер масла на угар; 14 — система кондиционирования воздуха на впуске в двигатель; 15 — блок редукторов системы калибрования газоанализаторов; 16 — термоконстантная установка для стабилизации температуры и влажности фильтров измерения выбросов твердых частиц перед их взвешиванием; 17 — стойка систем электропитания и управления стендом; 18 — пульт управления стендом; 19 — фильтр системы впуска воздуха в двигатель; 20 — расходомер воздуха; 21 — расходный бак для топлива; 22 — труба системы выпуска ОГ; 23 — система вентиляции бокса — приточная; 24 — система вентиляции бокса — вытяжная

хронной машины — 410 В; номинальный ток — 800 А;

- восьмиканальной системой регистрации давлений модели COMBI-USB, позволяющей в реальном времени проводить индицирование высоких и низких давлений рабочего процесса двигателей; анализ индикаторных показателей и характеристик тепловыделения испытуемого двигателя;

➤ расходомером топлива типа PLU 121 KMA 4000 производства фирмы «Pierburg-AVL» (Австрия), объемного динамического принципа действия с корректировкой расхода топлива в зависимости от его плотности, точность измерения расхода топлива — 0,1 %;

➤ расходомером воздуха на входе в двигатель типа DN 200 (диаметром трубы 200 мм) фирмы АBB (Германия), основанном на принципе термоанометрии, с точностью измерения расхода воздуха в диапазоне 200–4000 кг/ч — 0,1 %;

➤ газоанализаторами типа 7500D фирмы «Hogiba» (Япония) для измерения газообразных ВВВ до и после системы нейтрализации и типа 1170NX для измерения концентрации аммиака (NH_3) после нейтрализатора при применении системы селективного каталитического восстановления (SCR), точность измерения концентраций газообразных ВВВ — 1 %;

➤ микротоннелем типа Microtrol 5 фирмы «Nova-MMB» (Чехия) для измерения выбросов РТ, работающим по методу частичного разбавления ОГ. Важной составной частью технологии определения удельных выбросов РТ является использование установки фирмы «Hogiba» с высокоточными весами типа Sartorius CP2P-F. Установка обеспечивает стабилизацию температуры и влажности фильтров в процессах измерения их массы до и после испытаний, погрешность измерения массы фильтра не более 2 мкг;

➤ дымомером, работающим в режиме измерения коэффициента поглощения ОГ типа Oрасimeter 439 фирмы AVL, погрешность измерения коэффициента поглощения — 0,1 %;

➤ модулями измерения температур и давлений в системах двигателя;

➤ расходомером картерных газов и расходомером масла на «угар»;

➤ модулем кондиционирования воздуха, поступающего в двигатель, типа LLK 130, обеспе-



Рис. 2. Вид пультового помещения испытательного стенда

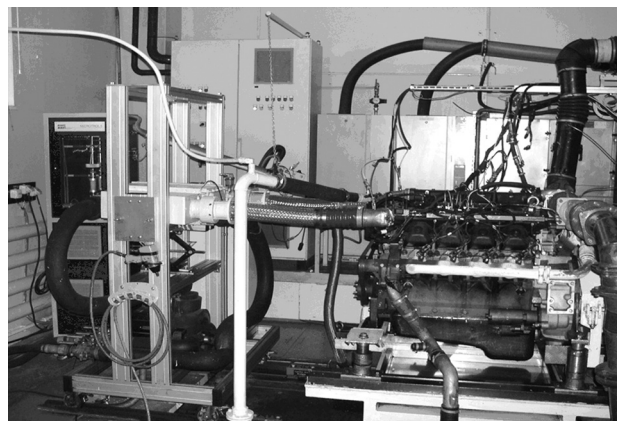


Рис. 3. Установка двигателя на испытательном стенде



Рис. 4. Общий вид установки газоанализатора фирмы «Hogiba» в отдельном помещении

чивающим стандартные параметры воздуха по температуре и влажности, максимальная производительность установки составляет 2400 м³/ч. Точность регулирования температуры воздуха на выходе из установки $\pm 0,5$ К, влажности ± 5 % относительной влажности. Стандартные и неизменные параметры воздуха на впуске также способствуют повышению точности и воспроизводимости результатов исследования рабочего процесса и определения ВВВ при испытании двигателей.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к современному испытательному стенду двигателей, является строгое выполнение требований по метрологии. Системное проведение

Удельные ВВВ двигателя КамАЗ модели 740.755-440, определенные в цикле ЕТС, по результатам испытаний на стенде КамАЗа и стенде НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ»

ВВВ, определенные на испытательном стенде КамАЗа, г/кВт·ч				
Вариант системы нейтрализации (SCR)	СО	СН	NO _x	РТ
«Bosch» Denoxtronic 2.1	0,73	0,05	1,62	0,024
«ДИНЕКС РУСЬ» Dinex 42936	0,72	0,06	1,61	0,022
ВВВ, определенные на испытательном стенде в НИЦИАМТ ФГУП НАМИ,				
«Bosch» Denoxtronic 2.1	0,63	0,06	1,59	0,027
«ДИНЕКС РУСЬ» Dinex 42936	0,63	0,06	1,60	0,025
Предельные значения Правил ЕЭК ООН № 49-05B2 (ЕВРО-5), цикл ЕТС	4,0	0,55	2,0	0,030

калибровок оборудования и средств измерений — одно из необходимых условий обеспечения точности применяемых методов измерений.

На рис. 2–4 представлены фотографии основных помещений испытательного стенда, размещения оборудования и средств измерений.

Результаты работ по выполнению нормативных требований Евро-5

Для выполнения нормативных требований Евро-5 в НТЦ КамАЗа проводились исследовательские испытания базового дизеля КамАЗ модели 740.755-440. В соответствии с основными положениями и определениями действующего нормативного документа [6] при проведении стендовых испытаний двигателя особое внимание уделялось оценке точности определения удельных ВВВ, анализу их правильности и воспроизводимости. В табл. 2 представлены результаты определения ВВВ по циклу ЕТС одного и того же двигателя КамАЗ модели 740.755-440, полученные на стенде КамАЗа и на стенде испытаний двигателей в НИЦИАМТ ФГУП НАМИ, при неизменных настройках его аппликационных параметров. Следует отметить, что испытательный стенд НИЦИАМТ создан на базе оборудования фирмы AVL, а стенд КамАЗа, как указывалось выше, создан на основе оборудования, поставленного фирмой «Hogiba». Переходный цикл (ЕТС) является наиболее сложным в техническом исполнении. Его продолжительность по времени составляет 30 мин, посекундное изменение частоты вращения двигателя и его нагрузки стандартизовано Правилами ЕЭК ООН № 49-05. Соответствие динамики двигателя критериям Правил должно подтверждаться результатами регрессионного анализа изменения частоты вращения, крутящего момента и мощности двигателя в сравнении с установленными на них допустимыми отклонениями. Полученные в межлабораторном эксперименте результаты испытаний двигателя с определением ВВВ по циклу ЕТС подтвердили соответствие двигателя

критериям регрессионного анализа, а также высокую воспроизводимость определенных в эксперименте значений ВВВ.

В статье [7] были подробно рассмотрены особенности конструкции дизелей КамАЗ уровня Евро-4, в том числе системы топливоподачи типа CR, на базе компонентов (насос высокого давления, инжекторы, рэйлы), датчиков и электронного блока управления фирмы «Bosch» (Германия). Дизели КамАЗ уровня Евро-5 разработаны с

двумя вариантами систем топливоподачи типа CR: на базе компонентов производимых фирмой «Bosch» и альтернативный вариант — на базе компонентов, производимых российскими предприятиями и поставляемых КамАЗу с ОАО ЯЗДА. В обоих вариантах двигателей в процессе их испытаний настройкой процесса топливоподачи по углам опережения и давлениям впрыскивания топлива при ограничении его максимума значением 1600 бар достигались целевые значения: удельных выбросов NO_x до системы нейтрализации около 9,0 г/кВт·ч; удельных выбросов РТ после системы нейтрализации на 20–25 % ниже норм Евро-5. С целью выполнения требования Евро-5 по оксидам азота (NO_x < 2,0 г/кВт·ч) были внесены изменения, в сравнении с Евро-4, в стратегии впрыскивания мочевины системами SCR. Результаты проведенных в НТЦ контрольных испытаний базового двигателя модели 740.755-440 по циклам Правил ЕЭК ООН № 49-05 с вышеуказанными вариантами систем топливоподачи и вариантами систем нейтрализации SCR: «Bosch» Denoxtronic 2.1 и «ДИНЕКС», Dinex 42936, подтвердили их соответствие требованиям Евро-5 по ВВВ. В 2014 г. КамАЗ в технической службе НИЦИАМТ ФГУП НАМИ провел сертификационные испытания семейства дизелей в комплектации системой топливоподачи «CR», на базе компонентов фирмы «Bosch», а в 2015 г. то же семейство прошло сертификационные испытания в комплектации системой топливоподачи CR на базе компонентов российских производителей. На основании полученных протоколов испытаний, КамАЗу выданы Сообщения о соответствии заявленного семейства дизелей требованиям Правил ЕЭК ООН № 49-05B2(G) в отношении: ВВВ с подтверждением их долговечности через факторы ухудшения; системы бортовой диагностики (стадии II); контроля выбросов NO_x. Также получены Сообщения о соответствии всех двигателей семейства Евро-5 (740.755-440, 740.745-420, 740.735-400, 740.725-

360, 740.715-320, 740.705-300) требованиям Правил ЕЭК ООН № 24-03 по дымности ОГ и требованиям Правил ЕЭК ООН № 85-00 по полезной мощности.

Следует отметить, что высокая воспроизводимость результатов испытаний обеспечена, в первую очередь, качественной организацией рабочих процессов двигателей КамАЗ уровня Евро-5 и их систем нейтрализации ОГ, а также комплексом мероприятий по повышению точности результатов испытаний, реализованных на этапе разработки и создания испытательного стенда. Результаты проведенного межлабораторного эксперимента, а также положительные результаты сертификационных испытаний двух семейств дизелей КамАЗ и одного семейства газовых двигателей подтверждают соответствие испытательного стенда двигателей, созданного на КамАЗе, требованиям Правил ЕЭК ООН № 49-05 (Евро-5) по точности определения экологических показателей двигателей.

В текущем году с целью дальнейшего развития испытательной базы и эффективного выполнения исследовательских и опытно-конструкторских работ в НТЦ КамАЗа вводится в действие новое газоаналитическое оборудование фирмы «Horiba»: газоанализаторы моделей МЕХА-7100D, МЕХА-7100DEGR, МЕХА-ONE; микротоннель для измерения массы дисперсных частиц модели MDLT-1304 TMA; установка для измерения количества частиц в ОГ модели МЕХА-2100 SPCS; новая версия программного обеспечения STARS, позволяющая проводить испытания двигателей коммерческого транспорта и внедорожной техники по циклам уровня Евро-6.

Выводы

1. На созданном в НТЦ КамАЗа исследовательском моторном стенде проведен комплекс исследований рабочих процессов двигателей КамАЗ с целью выполнения требований Евро-5. Модульный и рациональный принцип размещения оборудования, реализованный в проекте стенда, обеспечивает высокую точность и воспроизводимость результатов определения ВВВ, подтвержденных результатами межлабораторного эксперимента, а также результатами сертификационных испытаний двигателей.

2. В соответствии с требованиями Технического регламента Таможенного союза «О безопасности

колесных транспортных средств» в первом полугодии текущего года ПАО «КамАЗ» завершило работы по сертификации двух семейств дизелей и одного семейства газовых двигателей, получены сообщения об их соответствии требованиям Евро-5.

3. Дальнейшее развитие в ПАО «КамАЗ» испытательных стендов на основе комплектации их современными технологиями исследования рабочего процесса двигателей и новым оборудованием фирмы «Horiba» для определения ВВВ, в том числе количества частиц, создают необходимые условия для разработки новых платформ дизелей и газовых двигателей КамАЗ, соответствующих требованиям Евро-6.

Литература

1. Франц К. Мозер. Тенденции и решения в разработке коммерческих дизельных двигателей. Международная научно-техническая конференция «Турбонаддув автомобильных и тракторных двигателей». — Протвино, Россия. — 24–25 июня 2009.
2. Кутенев В., Лежнев Л.Ю., Лукино В.А. и др. Системы и агрегаты современных энергоустановок для автомобилей и автобусов. — М.: Экология. Машиностроение. — 2012. — 246 с.
3. Испытания двигателей внутреннего сгорания / Стефановский Б.С., Скобцов Е.А., Корси Е.К. и др. — М.: Машиностроение, 1972. — 368 с.
4. Правила ЕЭК ООН № 49-05 Единые предписания, касающиеся подлежащих к принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и твердых частиц из двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для использования на автотранспортных средствах, а также выбросов загрязняющих газообразных веществ из двигателей с принудительным зажиганием, работающих на природном газе или сжиженном нефтяном газе и предназначенных для использования на транспортных средствах. Поправки серии 05, 06.
5. Martyr A.J., Plint M.A. Engine testing. — 2006. — 442 p.
6. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения».
7. Повышение экологических показателей качества автомобильных дизелей КамАЗ — основное направление их развития / И.Ф. Гумеров, Р.Х. Хафизов, Е.Р. Борисенков и др. — Двигателестроение. — № 1 (251). — 2013.