

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ**

**EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR THE RESEARCHING
OF THE WORKING PROCESS OF DIESEL**

Кухаренок Г.М., д-р. техн. наук, проф. ;
Березун В.И., канд. техн. наук; *Предко А.В.*, ст. препод.
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь

G. Kukhareнок, doctor of technical Sciences, Professor;
V. Berezun, Ph.D. in Engineering, *A. Predko*, senior lecturer
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Разработана экспериментальная установка на базе современного испытательного и измерительного оборудования. Отличительными особенностями установки являются: автоматизация процесса измерения и осреднения результатов, оперативный мониторинг изменения индикаторной диаграммы, момента начала и продолжительности впрыска, контроль степени рециркуляции отработавших газов по концентрации CO₂ в отработавших газах и свежем заряде, соответствующая по материальному обеспечению, методике измерений, точности, перечню контролируемых и измеряемых параметров международным требованиям Правил ЕЭК ООН № 96.

Ключевые слова: оборудование измерительное, дизель, диаграмма индикаторная, газы отработавшие, рециркуляция газов, точность измерений.

The experimental installation on the basis of modern test and measuring equipment is developed. The distinctive features of the installation are: automation of the measurement process and averaging of the results, operational monitoring of changes in the indicator diagram, the start and duration of injection, control of the degree of exhaust gas recirculation by the concentration of CO₂ in the exhaust gases and fresh charge, corresponding to the material support, measurement methods, accuracy, the list

of controlled and measured parameters to the international requirements of UNECE Regulation No. 96.

Keywords: measuring equipment, diesel, chart indication, exhaust gases, recirculation of gases, the measurement accuracy.

Введение

Экспериментальная установка предназначена для исследования влияния конструктивных и регулировочных параметров дизелей на показатели рабочего процесса [3,4].

Установка (рисунок 1) состоит из дизеля серии Д-245 производства ОАО «Управляющая компания холдинга «МИНСКИЙ МОТОРНЫЙ ЗАВОД» (4ЧН11/12,5) мощностью 90 кВт, установленного на тормозной стенд, системы управления и активного контроля параметров топливоподачи дизеля, режимами нагружения, комплекса индицирования и систем измерения параметров работы дизеля и состава отработавших газов согласно требованиям действующих нормативных документов [1, 2].

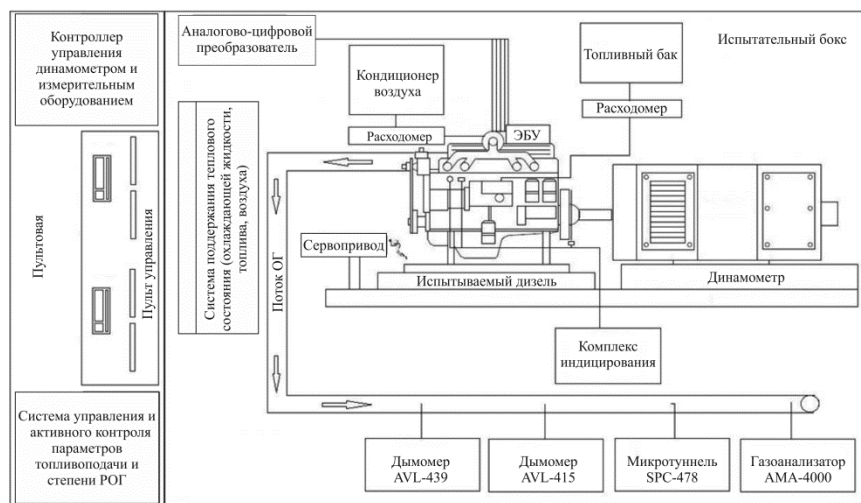


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследования рабочего процесса дизеля

1. Тормозной стенд

Тормозной стенд представляет собой динамометр постоянного тока (максимальная мощность 247 кВт) с принудительным воздушным охлаждением и комплексом оборудования, предназначенного для измерения крутящего момента ($M_{к \max} = 813 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при $n = 1330 \text{ мин}^{-1}$) с одновременным изменением частоты вращения.

Измерение крутящего момента основано на измерении реактивного момента между нагрузкой динамометра и динамометром. Для измерения реактивной силы применяется измерительный фланец, содержащий тензометрический датчик T10F (рисунок 2), сигнал от которого обрабатывается в нормированный аналоговый или FM-модулированный сигнал.

Калибровка динамометра производится посредством подвешивания специальных грузов на калибровочные плечи длиной 1,0197 м, и корректировки калибровочной кривой согласно расчетным значениям крутящего момента при разрыве механической связи между измерительным фланцем и дизелем путем демонтажа карданной муфты. Для расчета значение гравитационного ускорения принималось равным $9,8067 \text{ м/с}^2$.

Для измерения частоты вращения с обратной стороны вала машины установлен инкрементный датчик IRC 305, имеющий диапазон измерения $300 \dots 2900 \text{ мин}^{-1}$.

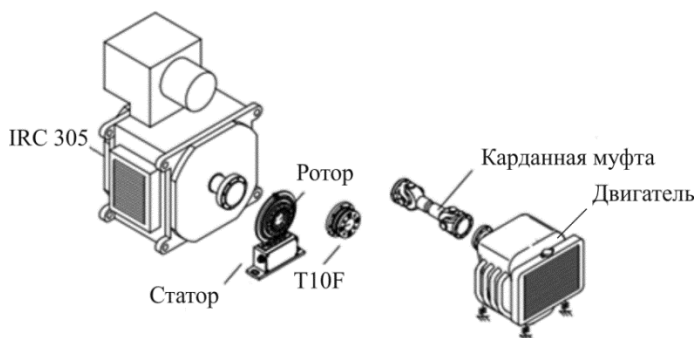


Рисунок 2 – Схема тормозного стенда

Дизель установлен на стойки крепления через демпфирующие подушки, подсоединен к кардану тормозного стенда и отцентрирован (рисунок 3).

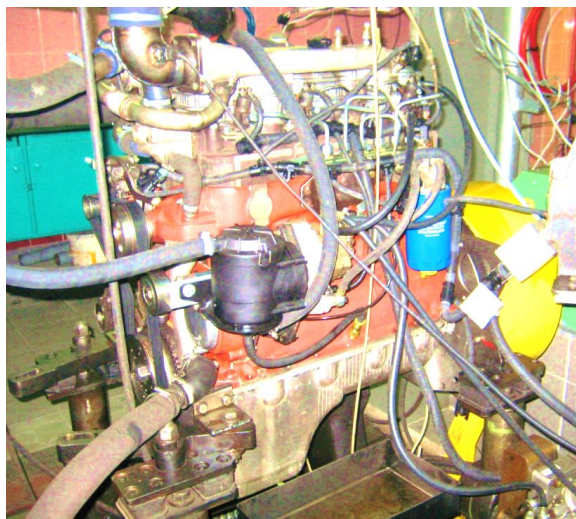


Рисунок 3 – Дизель, установленный на тормозной стенд

Датчики давления и температуры смонтированы на деталях систем дизеля путем доработки характерных мест под установку переходных штуцеров, бонок и переходных проставок. Сигнал от датчиков после аналогово-цифрового преобразователя посредством измерительных каналов подается в систему управления стенда.

Соответствующие системы дизеля подсоединяются к стендовым системам поддержания теплового состояния охлаждающей жидкости, топлива и наддувочного воздуха.

Для охлаждения моторного масла используется штатный жидкостно-масляный теплообменник.

Дизельное топливо под действием гидростатического давления из топливных баков, закрепленных на стене бокса, подводится к расходомеру топлива AVL-735S и после кондиционера топлива AVL-753C, регулятора давления, фильтра тонкой и грубой очистки направляется к топливному насосу высокого давления дизеля.

Расходомер воздуха ИРВИС-РС-4, стационарно закрепленный на стене после воздушного фильтра, подсоединен к турбокомпрессору

посредством металлических труб, резиновых патрубков и хомутов. Принцип действия прибора основан на эффекте формирования в следе за телом обтекания цепочки вихрей, частота следования которых пропорциональна объемному расходу, определяемому на основании измерения скорости охлаждения сопротивления термопреобразователя потоком рабочего газа, теплофизических свойств газа (давления и температуры). Диапазон измерения расходомера воздуха 180...7000 м³/ч; пределы основной относительной погрешности в диапазоне работы до 0,2 измерительной шкалы 1,3 % и свыше – 1 %; пределы допускаемой относительной погрешности по выходу стандартного интерфейса каналов измерения температуры и давления составляют соответственно 0,5 % и 0,6 %.

Влажность воздуха на впуске измеряется емкостным гигротермодатчиком канального исполнения, обеспечивающим измерение влажности в рабочей области от 0 до 100 % с временем отклика – 10 с.

Для исключения поджатия потока на всасывании за счет разряжения, длина компенсационных патрубков между трубами не превышает 5 мм.

Выпуск отработавших газов (ОГ) организован через принудительную систему дымоудаления с разряжением в системе после заслонки, не превышающим 0,5 кПа. Для исключения влияния на результаты испытаний система вентиляции картерных газов дизеля отключена, газы после сапуна удаляются из бокса за счет работы системы вытяжной вентиляции.

Разряжение на впуске и противодействие на выпуске, оговоренные в технических условиях на дизель, устанавливаются заслонками стендовых систем впуска и выпуска, и на номинальном режиме работы дизеля составляют 7 кПа.

Приток и охлаждение воздуха осуществляется кондиционером. Температура в испытательном боксе и температура впускного воздуха поддерживается автономной системой кондиционирования в диапазоне 20±3 °С.

Расход топлива измеряется массовым расходомером с кориолисовым датчиком потока. Диапазон измерения расходомера находится в диапазоне 0...125 кг/ч; частота опроса датчика составляет 10 Гц.

Кондиционер топлива поддерживает температуру в диапазоне 38 ± 2 °С.

Температура охлаждающей жидкости и температура наддувочного воздуха контролируется системой управления стендом и поддерживаются в диапазоне 85 ± 3 °С и 45 ± 3 °С соответственно.

Температура выхлопных газов измеряется термопарами с диапазоном измерения 200...1200 °С, остальные температуры измеряются датчиками сопротивления с диапазоном измерения 50...300°С.

При проведении метрологической аттестации стенда калибровка датчиков измерения температуры осуществляется путем нагрева датчика в калибраторе температуры АТС 650В с внешним термометром, прошедшими поверку в РУП «Белорусский государственный институт метрологии», по двум точкам калибровочной кривой. Проверка измеряемых значений проводится по измерительным каналам стенда, используемым в процессе измерения. В случае с высокотемпературными датчиками, верхний диапазон калибровки составляет 650 °С.

Для измерения давления применяются микромеханические датчики мембранного типа DMP331 с чувствительным элементом DSP401, который, совместно со встроенным электронным усилителем и температурным компенсатором, вмонтированы в общий корпус из нержавеющей стали. В качестве наполнителя используется масло, питание датчика осуществляется источником постоянного тока. При проведении метрологической аттестации стенда для воспроизведения давления, к каналу измерения подключается пневматическая помпа и эталонный датчик IDOS, проходящие периодическую поверку в РУП «Белорусский государственный институт метрологии».

Перечень измеряемых параметров с погрешностью измерений, соответствующим требованиям нормативных документов [1, 2] сведен в таблицу.

В контуре измерения расхода топлива помимо механического топливоподкачивающего насоса дизеля дополнительно используются два электрических насоса для обеспечения работы расходомера и кондиционера топлива. Поэтому для обеспечения устойчивой работы аккумуляторной системы топливоподдачи необходимо проведение процедуры регулировки давления в подводящей и отводящей

топливных магистралях. Настройка вентиля регулятора давления производится таким образом, чтобы достичь минимальной амплитуды мгновенных значений расхода топлива на номинальном режиме работы дизеля.

Таблица 1 – Измеряемые параметры

Измеряемый параметр	Обозначение	Ед. измерения	Погрешность измерения
1	2	3	4
Частота вращения коленчатого вала	n	мин ⁻¹	0,2%
Крутящий момент	M_k	Н·м	0,5%
Часовой расход топлива	G_t	кг/ч	±0,25%
Объемный расход воздуха	V_v	м ³ /ч	±1...1,3%
Барометрическое давление	B_0	кПа	±0,1 кПа
Относительная влажность воздуха	ψ	%	±3,5%
Температура воздуха на впуске	$t_{вп}$	°С	±1 °С
Температура воздушного заряда после смешивания с рециркулируемыми газами	$t_{см}$	°С	±1 °С
Температура масла	t_m	°С	±3 °С
Температура охлаждающей жидкости	$t_{ож}$	°С	±3 °С
Температура воздуха после ТКР	t_k	°С	±1 °С
Температура воздуха после ОНВ	$t_{к'}$	°С	±1 °С
Температура ОГ перед ТКР	t_{tr}	°С	±10 °С
Температура ОГ после ТКР	$t_{r'}$	°С	±10 °С
Температура ОГ после охладителя РОГ	$t_{рог}$	°С	±1 °С
Давление на впуске	$p_{вп}$	кПа	±0,05 кПа
Давление наддува после ТКР	p_k	кПа	±1 кПа
Давление наддува после ОНВ	$p_{к'}$	кПа	±0,5 кПа
Давление выпуска перед ТКР	p_r	кПа	±1 кПа
Давление выпуска после ТКР	$p_{r'}$	кПа	±0,5 кПа
Давление впрыска топлива	$p_{впр}$	МПа	±0,05 МПа
Объемная концентрация THC в ОГ	C_{THC}	ppm	±2,2%
Объемная концентрация NO_x в ОГ	C_{NO_x}	ppm	±2,3%
Объемная концентрация CO в ОГ	C_{CO}	ppm	±2%
Объемная концентрация CO_2 в ОГ	C_{CO_2}	%	±0,8%
Объемная концентрация CO_2 воздуха после смешивания с ОГ	$C_{CO_2 \text{ РОГ}}$	%	±0,8%
Дымность ОГ	N	% HSU	±1 %

2. Система индицирования

Для проведения индицирования между маховиком и карданной муфтой был установлен специальный диск (рисунок 4), проградуированный через 0,5 градуса поворота коленчатого вала, крепящийся посредством шпилек к маховику.

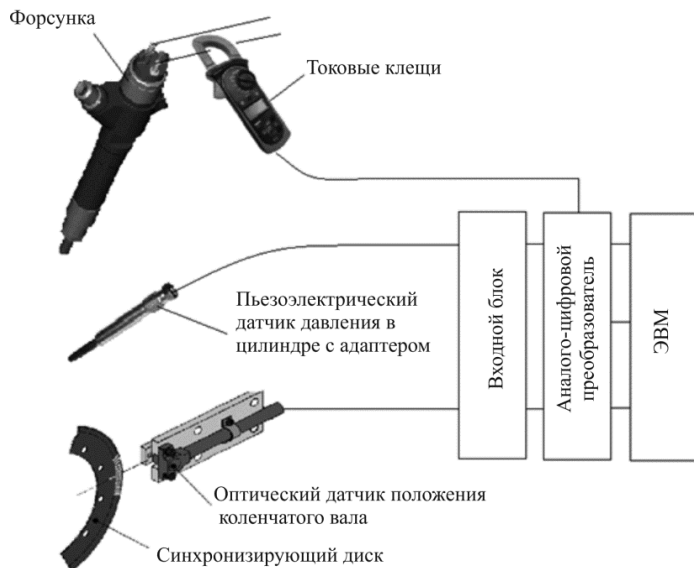


Рисунок 4 – Система индицирования дизеля

Оптический датчик положения коленчатого вала с синхронизирующим диском, определяющие частоту записи давления газов в цилиндре, позволяют определить местоположение маховика и производить высокочастотную запись сигналов в зависимости от положения коленчатого вала.

Пьезоэлектрический датчик давления имеет погрешность измерения $\pm 2\%$ в диапазоне измеряемых величин 3...20 МПа. Датчик смонтирован в специальный адаптер, который установлен в головку блока цилиндров вместо свечи накаливания первого цилиндра без дополнительной доработки узла.

Сигнал управления форсункой регистрируется при помощи токовых клещей, закрепленных на жгутах проводов дизеля.

Измерительные сигналы после блоков усилителей и аналого-цифровых преобразователей записывается комплексом индицирования AVL INDIMASTER ADVANCED 670. Определение ВМТ корректируется при помощи предварительной автоматической обработки индикаторной диаграммы до начала испытаний, предусмотренных программным обеспечением измерительного комплекса, при прокрутке дизеля от балансирной машины без подачи управляющего сигнала на форсунки (без топливоподачи) [5].

Для вывода на рабочий экран мгновенных значений давления газов в цилиндре, сигнала управления форсункой в виде графической зависимости от угла поворота коленчатого вала, частоты вращения коленчатого вала и других параметров, предусмотренных программным комплексом IndiCom 1.3, сформирована рабочая область, включающая настройку измерительных каналов, блоков усилителей и параметров сенсоров.

В момент изменения параметров топливоподачи осуществляется мониторинг изменения индикаторной диаграммы. После стабилизации параметров дизеля, синхронно с началом измерения параметров тормозным стендом, записываются данные индицирования в отдельный файл. Значения давления газов в цилиндре фиксируются на протяжении 50-ти циклов сгорания, после чего усредняются.

3. Оборудование для определения экологических показателей

Измерение газообразных составляющих ОГ осуществляется газоаналитическим комплексом АМА 4000 (рисунок 5) производства фирмы "Pierburg" (Германия), регистрирующим объемные концентрации THC , NOx , CO , CO_2 и CO_2 в системе рециркуляции отработавших газов (РОГ).

Проба ОГ забирается из выхлопной трубы испытательного стенда принудительно через пробоотборный зонд посредством насоса. После подогреваемого фильтра по обогреваемым линиям, температура в которых для предотвращения образования конденсата поддерживалась блоком нагрева пробы со встроенным регулятором температуры на уровне 190 °С, отобранная проба подается в измерительные камеры приборов [6].

Измерение *ТНС* происходит анализатором, работающим на основе метода ионизации атомов органических углеродов в водородном пламени, что обеспечивает протекание электрического тока, пропорционального атомам углерода, между электродами различных потенциалов.

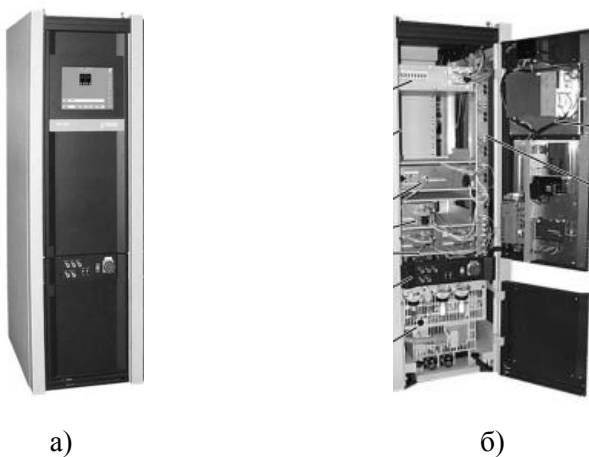


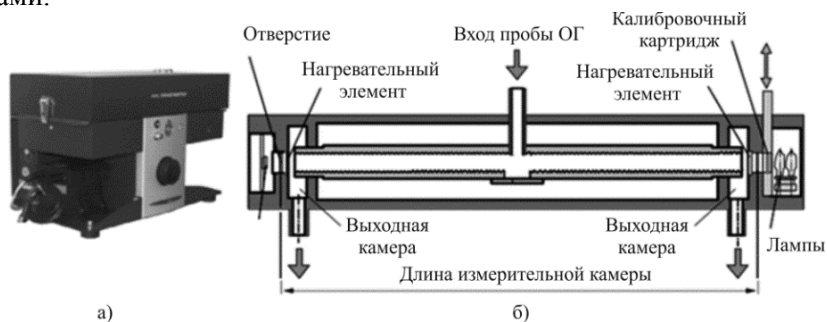
Рисунок 5 – Газоаналитический комплекс АМА-4000

Выбросы *NOx* определяются прибором, принцип работы которого основан на интенсивности хемилюминесцентного излучения при окислении *NO* в среде *O₃*. Световой поток, излучаемый при реакции, пропускается через оптический фильтр на датчик фотоумножителя, который преобразуется в электрический сигнал, пропорциональный люминесцентной интенсивности.

Для измерения *CO*, *CO₂* и *CO₂* роф используются приборы с принципом работы основанном на распознавании спектра поглощения инфракрасного излучения, пропускаемого через пробу ОГ. На основании разницы электрических сигналов датчиков, фиксирующих непоглощенное инфракрасное излучение от референсного газа, не содержащего анализируемые компоненты, и анализируемой пробы определяется концентрация соответствующих компонентов ОГ.

Перед измерением концентрации газовых компонентов производится калибровка, заключающаяся в пропускании через измерительные камеры приборов соответствующих калибровочных газов с концентрацией, соответствующей диапазону измерения. После завершения испытаний проводится повторная проверка анализаторов путем повторного пропускания калибровочных газов через измерительные камеры приборов. Расхождение величин концентрации калибровочных газов до и после измерения не должна превышать 2 %.

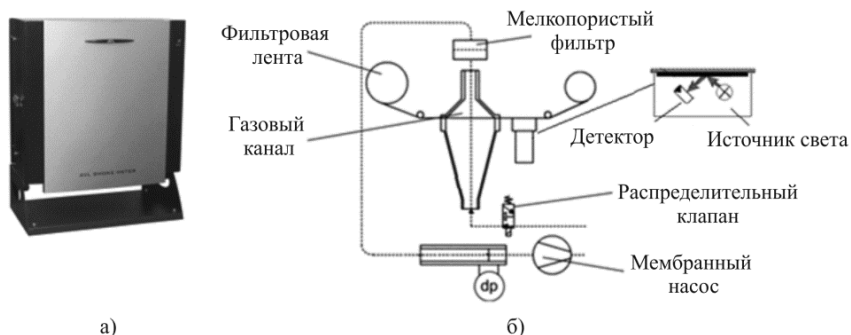
Дымность ОГ определяется дымомером *AVL-439* (рисунок 6), измеряющим потерю интенсивности светового потока (преломление, поглощение или отражение) между источником и приемником (детектором) в измерительной камере определенной длины. Прозрачность выхлопного газа вычисляется по закону Бира-Ламберта [7]. Перед началом испытаний проводится проверка детектора при помощи стекол с известными параметрами затемненности. Разрешение измерения составляет 1 Гц, единица измерения может определяться по шкале *Hartridge* в % *HSU* или м^{-1} в виде коэффициента поглощения k . Поток пробы 40...49 л/мин через измерительную камеру с фотометрической базой 0,43 м обеспечивается двумя мембранными насосами.



а) внешний вид; б) схема работы
Рисунок 6 – Дымомер *AVL-439*

Для определения концентрации сажи в ОГ используется прибор *AVL-415* (рисунок 7), принцип действия которого основан на учете степени почернения фильтрующей бумаги после пропускания пробы ОГ [8].

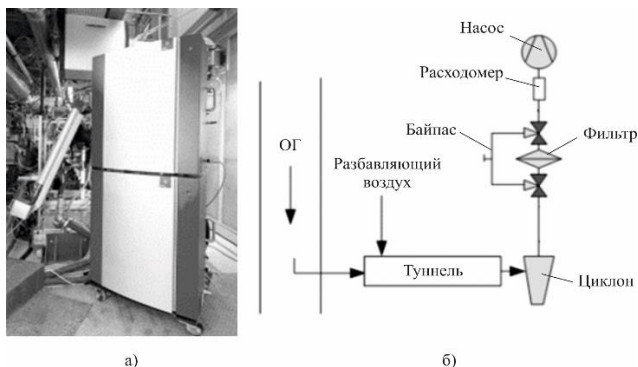
Предел измерения прибора составляет $0 \dots 10 \text{ FSN}$ с разрешающей способностью $0,01 \text{ FSN}$ и относительной погрешностью $\pm 2 \%$. Эффективная длина измерения прибора составляет 405 мм, стандартизованная *ISO 10054*. Значение *FSN* представляет собой результат измерения пробы 330 см^3 (при давлении 1 бар и температуре 298 К), образующей на фильтрующей ленте пятно диаметром 32 мм.



а) общий вид; б) схема работы
Рисунок 7 – Дымомер *AVL-415*

Для обеспечения сопоставимости результатов во всем диапазоне измерений, объем просасываемой пробы определяется в автоматическом режиме исходя из условия обеспечения степени почернения $PB=2,5$ (рекомендуемый диапазон $0,5 \dots 5$). При этом время измерения составляет 6 с на 1 литр пробы, которое обеспечивается производительностью мембранного насоса, управляемым микроконтроллером на основании показаний датчиков давления, температуры и объема пробы ОГ.

Выброс дисперсных частиц измеряется гравиметрическим методом при помощи микротуннеля *SPC-478* частично-поточного разбавления потока ОГ (рисунок 8). Через фильтр диаметром 47 мм пропускается проба, разбавленная воздухом. Значение коэффициента отбора пробы ОГ в процессе измерения поддерживается на одном уровне. Коэффициент разбавления изменяется автоматически с учетом изменения расхода ОГ на различных режимах работы для обеспечения постоянного расхода газа через фильтр.



а) общий вид; б) схема работы
Рисунок 8 – Микротуннель SPC-478

Скорость потока через фильтр является регламентированным показателем и для диаметра фильтра 47 мм эта величина не должна превышать 100 см/с, что соответствует расходу 1,2 г/с. Максимальная температура пробы перед фильтром во время измерения не должна превышать 52 °С, а рекомендованная минимальная загрузка фильтра, которая позволяет обеспечить высокую повторяемость и сопоставимость результатов измерения, составляет 0,5 мг. Максимальное значение перепада давления на фильтре рекомендуется не превышать 150 мбар [9]. Перед измерением проводится проверка на герметичность газовых контуров под давлением и в вакууме, калибровка внутреннего расходомера во всем диапазоне работы и степени открытия байпасного клапана с целью минимизации пульсаций потока в процессе измерения. При настройке параметров разбавления, проба пропускается по байпасному каналу мимо кассеты с фильтрами за счет перенаправления газового потока распределительными клапанами.

Масса твердых частиц определяется взвешиванием фильтров до и после измерения на электронных весах *Mettler Toledo MX5/A* (рисунок 9), имеющих диапазон измерения до 5,1 г и класс точности 1а, в камере кондиционирования с температурой 22 °С и относительной влажностью 45 %. Стабилизация фильтров осуществляется не менее 8 часов до первичного взвешивания и не менее 12 часов после испытаний. Производится дополнительное взвешивание двух эталонных

фильтров, которые постоянно находятся в камере кондиционирования. Разность при контрольном взвешивании должна составлять не более 1 мкг.



Рисунок 9 – Электронные весы *Mettler Toledo MX5/A*

При необходимости степень РОГ определяется на основании измеренных концентраций CO_2 [10, 11]:

$$\rho_p = \frac{c_{CO_2} - c_{CO_2\text{ в с}}}{c_{CO_2\text{ РОГ}} - c_{CO_2\text{ в с}}},$$

где c_{CO_2} – объемная концентрация CO_2 в выпускном коллекторе, *ppm*; $c_{CO_2\text{ РОГ}}$ – объемная концентрация CO_2 во впускном коллекторе, *ppm*; $c_{CO_2\text{ в с}}$ – объемная концентрация CO_2 во внешней среде, *ppm*.

Определение промежуточных и итоговых удельных показателей выбросов вредных веществ производится согласно методике Правил ЕЭК ООН № 96.

Литература

1. ГОСТ 18509–88. Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. – Введ. 1990-01.01. – М.: Изд-во стандартов, 1988 – 41 с.

2. ГОСТ 14846–81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – Введ. 1982-01.01. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 41 с.
3. Кухаренок, Г. М. Рабочий процесс высокооборотных дизелей. Методы и средства совершенствования / Г.М. Кухаренок. – Минск: БГПА, 1999. – 180 с.
4. Кухаренок, Г. М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей / Г. М. Кухаренок, А. Н. Петрученко, В. И. Березун. – Москва: Новое знание, 2014. – 220 с.
5. Concerto Software Version 3.7. – Graz: AVL List, 2004. – 916 p. (86).
6. Operating Instructions AMA 4000. – Graz: AVL List, 2004. – 32 p. (87).
7. Operating Instructions AVL 439. – Graz: AVL List, 2004. – 170 p. (88).
8. Smoke value measurement with the Filter-Paper-Method. – Graz: AVL List, 2004. – 112 p. (89).
9. Product Guide AVL SMART SAMPLER 478 – Graz: AVL List, 2004. – 176 p. (90).
10. Needham, J. The Low NO_x Truck Engine / J. Needham, D. Doyle, A. Nicol // SAE Technical Paper. – 1991. – № 910731. – P. 1–12. (91).
11. Havenith, C. Low Emission Heavy Duty Diesel Engine for Europe / C. Havenith, J. Needham, A. Nicol, C. Such // SAE Technical Paper. – 1993. – № 932959. – P. 1–14. (92).