

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-5-371-379

УДК 621.436

Оценка содержания дисперсных частиц в отработавших газах дизельных двигателей

Докт. техн. наук, проф. Г. М. Кухаренок¹⁾, В. И. Березун²⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),²⁾ОАО «УКХ «Минский моторный завод» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016

Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Загрязнения атмосферы выбросами вредных веществ ухудшают экологическую обстановку в мире. Отработавшие газы дизельных двигателей являются одним из основных загрязнителей окружающей среды. На текущий момент не удается определить степень и границу порогового уровня загрязнения воздуха, ниже которого частицы не оказывают влияния на здоровье человека. В статье рассмотрены актуальные вопросы нормирования и контроля дисперсных частиц. Для исследовательских работ наиболее удобны методы измерения, обеспечивающие быстрое получение результата. Однако легитимным, с точки зрения законодательства, является гравиметрический способ исследования, требующий соблюдения определенной процедуры регулировок и расчетов. Он предусматривает наличие сложной системы разбавления пробы, настройка которой должна учитывать как температурные, так и кинетические параметры измеряемого потока. Для обеспечения точности измерения и воспроизводимости результатов загрузка фильтра должна находиться в регламентируемом диапазоне, для чего параметры разбавления следует выбирать не только исходя из типа двигателя, но и из его уровня выброса. Способы оценки горячей пробы отработавших газов обладают большим быстродействием, а результаты коррелируются с показателями эффективности сгорания. Однако такой подход не учитывает ряд процессов, происходящих при остывании газов в окружающей среде. Поэтому в данном случае результаты измерения должны оцениваться в рамках определенных граничных условий применительно к объекту исследования. Трудность достижения современных экологических норм обусловлена сложным фракционным составом и многостадийностью процесса образования вредных компонентов. Приведены расчетные зависимости между частицами и дымностью, сделан их сравнительный анализ. Проанализированы методы измерения и исследования дисперсных частиц на основании результатов испытания двигателя при различных значениях параметров топливоподачи (давления впрыска и угла опережения впрыска топлива).

Ключевые слова: дисперсные частицы, дымность, фракционный состав

Для цитирования: Кухаренок, Г. М. Оценка содержания дисперсных частиц в отработавших газах дизельных двигателей / Г. М. Кухаренок, В. И. Березун // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 5. С. 371–379

Evaluation of Dispersed Particle Content in Exhaust Gas of Diesel Engine

G. M. Kuharonak¹⁾, V. I. Berazun²⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),²⁾OJSC “Minsk Motor Plant” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Pollution of an atmosphere due to hazardous substances emissions deteriorates ecological environment in the world. Exhaust gases of diesel engines are considered as one of the main environmental pollutants. At the moment it is not possible to determine rate and limits of threshold level of air pollution which do not affect human health. The paper considers current issues pertaining to regulation and control over dispersed particles. The most convenient measuring methods for investigations are those which provide the opportunity to obtain immediate results. However, from the legislative point of view, a gravimetric investigation method is a legitimate one which requires compliance with certain procedures of adjustments and calculations. The method presupposes availability of complicated system for sample dilution and its adjustment must include temperature and kinetic parameters of the measured flow. In order to ensure measuring accuracy and results reproducibility filter loading

Адрес для переписки

Кухаренок Георгий Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-81-86
dvs_atf@bntu.by

Address for correspondence

Kuharonak Georgy M.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-81-86
dvs_atf@bntu.by

should be in a regulated range and dilution parameters should be chosen according to not only engine type but also according to its emissions rate. Methods for evaluation of a hot exhaust gas sample is characterized by higher response and the results correlate with indices of combustion efficiency. However, such approach does not account for a number of processes that take place during gas cooling in the environment. Therefore, in this case, measuring results are to be evaluated within certain boundary conditions with respect to the object of investigations. Difficulty in achievement of modern ecological standards is substantiated by complicated fractional composition and multiple stage process in formation of hazardous components. The paper presents calculated dependences between particles and smokiness and contains a comparative analysis. Methods for measurement and investigations of dispersed particles have analyzed on the basis of the results obtained during engine tests at various values of fuel supply parameters (injection pressure and timing advance angle of fuel injection).

Keywords: dispersed particles, smokiness, fractional composition

For citation: Kuharonak G. M., Berazun V. I. (2016) Evaluation of Dispersed Particle Content in Exhaust Gas of Diesel Engine. *Science & Technique*. 15 (5), 371–379 (in Russian)

Введение

Обеспокоенность мирового сообщества климатическими изменениями на планете и загрязнением атмосферы порождает развитие программ по совершенствованию технологических процессов и ограничению выбросов. О глобальности проблемы говорит факт проведения экологических конференций по климату на межгосударственном уровне, результатом которых зачастую является наложение ряда обязательств по сокращению выбросов. Цель последней конференции (COP 21), прошедшей с 30 ноября по 12 декабря 2015 г. в Ле-Бурже во Франции, – подписание международного соглашения по поддержанию увеличения средней температуры планеты на уровне ниже 2°C , применимого ко всем странам. По мнению климатологов, все предпринимаемые меры носят лишь внешний характер, ввиду того что ограничение выбросов не является обязательным, а подписанные документы не предусматривают серьезной ответственности за нарушение соглашений.

Одним из основных загрязнителей воздуха, оказывающих негативное влияние на здоровье человека, являются взвешенные в воздухе частицы. Считается, что частицы с аэродинамическим диаметром более 10 мкм (PM-10) удаляются из атмосферы в течение нескольких часов после выброса. Частицы же с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм (PM-2,5) могут сохраняться в атмосфере до нескольких недель и способны беспрепятственно попадать в низкие области легких и альвеолы [1].

Говоря о нормировании дисперсных частиц, выбрасываемых дизельными двигателями, следует отметить, что практически во всех стандартах ограничивающим показателем является массовая характеристика выбросов. И только в нормах для колесных транспортных средств

финального уровня дополнительно введен качественный показатель – ограничение количества частиц [2, 3]. Для внедорожной техники такой показатель отсутствует вовсе, даже для техники экологического уровня Stage 4.

Сегодня не удается определить степень и границу порогового уровня загрязнения воздуха, ниже которого частицы не оказывают влияния на здоровье человека [1]. Однако после изучения современных научных подходов рабочая группа Всемирной организации здравоохранения пришла к выводу, что такой предел может существовать только в области нижних границ значений мониторинга, проводимого на территории Европы в настоящее время. Для достижения такого уровня регламентируемый выброс дисперсных частиц от двигателя, действующий на территории Европейского союза с 1992 г., должен был снизиться с 3,60 до 0,01 г/(кВт·ч) по циклу ESC.

Основная часть

На территории Евразийского таможенного союза за основу правил экологической безопасности взята европейская интерпретация, отраженная в технических регламентах со смещением сроков введения [4, 5]. Следуя европейскому сценарию, отечественные предприятия берут на вооружение уже выработанные мировые стратегии и подходы достижения современных норм, не участвуя в формировании и выработке критериев оценки токсичности выбросов, а также в выделении областей наибольшего влияния на фактор загрязнения.

По данным [6], предотвращение ущерба от транспортного средства в стоимостном выражении при переходе на более высокий экологический класс имеет нисходящую тенденцию, в то время как затраты на производство и сложность конструкции растут. Поэтому для раз-

живающихся стран, оказавшихся в роли догоняющих, справедлив вопрос: а являются ли адекватными столь высокие требования к двигателям без соответствующего нормирования сопряженных областей-источников вредных веществ? В отличие от стран с развитой экономикой, которые могут позволить себе принятие волевых решений, большинство вынуждены прагматично относиться к экологическому вопросу. Так, при проведении исследований продуктов износа шин и фрикционных материалов тормозов различных производителей на российском рынке было установлено превышение уровня нормативов выброса твердых частиц от отработавших газов в течение срока службы грузовых автомобилей и городского транспорта: шинами – в 150 раз, тормозными накладками – в 17 раз. Эти данные представила делегация Российской Федерации на 166-й сессии Всемирного форума по конструкции транспортных средств в г. Женеве (Швейцария) в июне 2013 г. как информационный документ WP.29-160-39.

Все перечисленное в очередной раз подтверждает сложность определения ключевых факторов влияния на экологическую обстановку. Привлечение внимания главным образом к нормам по выбросам транспортных средств обусловлено прогрессирующим увеличением автопарка в мире, большей токсичностью выбросов в сравнении с производственными стационарными источниками загрязнений, расположением выхлопных труб на малой высоте, близкой к уровню дыхания, плохо доступной областью для рассеивания ветром и эксплуатацией вблизи жилых районов. Дисперсные частицы занимают отдельное место среди нормируемых показателей, так как являются канцерогенами и накапливаются в организме в процессе жизнедеятельности человека.

Количество частиц после выхлопной трубы у двигателей экологического уровня ЕВРО-6, оборудованного системой очистки отработавших газов, меньше, чем в воздухе до фильтра на входе в двигатель. Таким образом, транспортное средство, соответствующее высокому экологическому классу, может быть очистительной системой атмосферы. Но если допустить, что выше определенного экологического уровня главным источником выбросов становится не двигатель, а продукты износа элементов транспортного средства, то на повестку дня

выходит вопрос о перераспределении либо добавлении новых показателей нормирования.

Несмотря на значительные успехи в области проектирования и доводки дизельных двигателей в последнее время главным образом за счет развития технологий в области топливоподачи, систем нейтрализации и электронного управления, необходимо понимать, что излишнее ограничение выбросов вредных веществ – это недополученная эффективность от сгорания топлива. Для того чтобы представить, насколько трудно достичь современных норм, необходимо рассмотреть состав и структуру дисперсных частиц, образующихся в дизельных двигателях.

Эмиссия от сгорания топлива состоит из трех фаз: твердой, жидкой и газовой. Первые две фазы образуются в результате неполного сгорания топлива и масла и представляют собой совокупность органических и неорганических веществ, элементов коррозии и износа двигателя. В составе дисперсных частиц, по результатам исследований, идентифицированы более 1000 видов веществ [7], которые классифицируют по основным четырем группам: углеродная, органическая, сульфаты с нитратами и неорганические примеси (рис. 1) [8, 9].

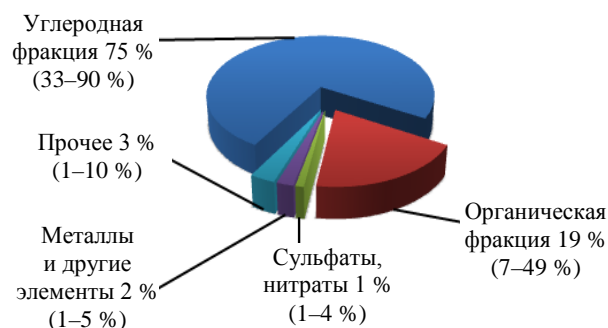


Рис. 1. Фракционный состав дизельных частиц

Fig. 1. Fractional composition of diesel particles

При работе двигателя на различных режимах изменяются как количественная, так и фракционная составляющие частиц. Неоднороден состав и в процессе протекания внутрицилиндровых реакций. Образование дисперсных частиц в дизельном двигателе – весьма сложный процесс, и несмотря на множество работ, посвященных этой теме, судить о его механизмах и природе можно лишь в приближенном виде. С точки зрения процессов, происходящих в цилиндре, механизм образования сажевых частиц наглядно представлен на рис. 2.

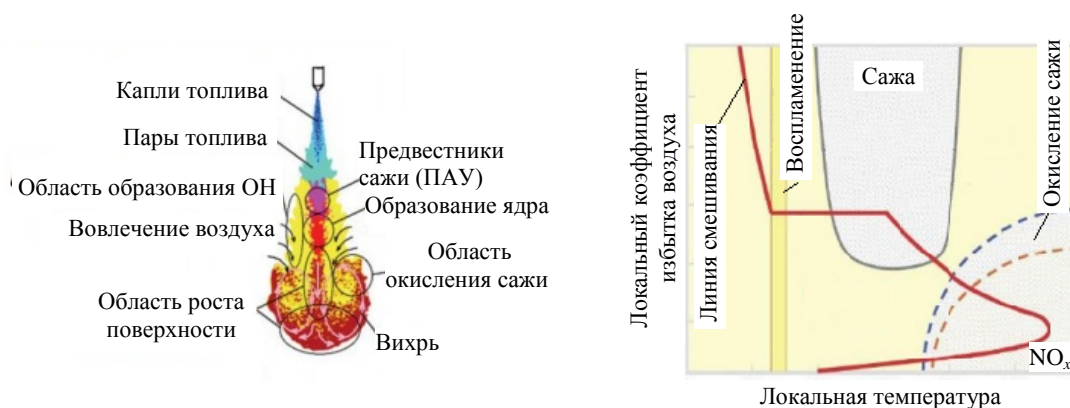


Рис. 2. Стадии образования частиц в камере сгорания

Fig. 2. Particle formation stages in combustion chamber

Основная часть элементарного углерода образуется в период диффузионного сгорания. Развивающаяся реакция горения в топливном факеле за счет вовлечения кислорода по периферийной области стимулирует интенсификацию образования гидроксильных радикалов, за счет которых происходит окисление наибольшей доли образовавшейся сажи. В более плотном центральном осевом ядре и переднем фронте факела ввиду кислородного голодания происходят процесс роста поверхности ядер и коагуляция сажи [10]. Оставшиеся продукты неполного сгорания топлива и масла, пройдя систему выпуска, попадают в атмосферу, где осуществляются их конденсация и адсорбция на поверхности твердых частиц, которые за это время образуют агломераты (рис. 3).

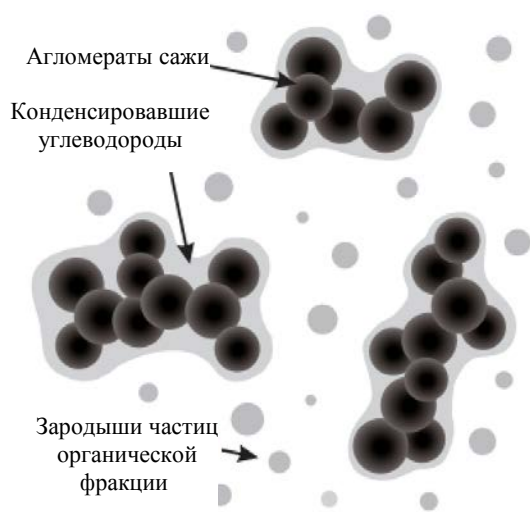


Рис. 3. Структура частиц

Fig. 3. Structure of particles

Все это указывает на то, что пределами камеры сгорания двигателя процесс формирования частиц не заканчивается и частично продолжается в атмосфере. Поэтому доводка рабочего процесса, с точки зрения улучшения экологических показателей, неразрывно связана с разработкой новых методик исследования и измерения, которые бы максимально правдоподобно учитывали реальные процессы.

До недавнего времени на итоговый показатель выбросов существенное влияние оказывали сульфаты, формирующиеся на последней стадии из-за высокого содержания серы в дизельном топливе. Однако современные тенденции снижения содержания серы, регламентированные законодательством, исключили данную составляющую из наиболее весомых. Аналогичный подход прослеживается и с зольной составляющей. Большинство производителей включают в химмотологическую карту только масла с низким зольным числом, тем самым снижая долю данной фракции в составе дисперсных частиц современных дизельных двигателей. Токсичность дисперсных частиц определяется также размерными и количественными показателями. Обобщенные данные выбросов различных типов дизелей приведены на рис. 4.

Сегодня единственный легитимный метод измерения дисперсных частиц, прописанный в правилах ЕЭК ООН, – гравиметрический. Если для измерения итоговых циклов токсичности применение всей процедуры является оправданным и единственно верным, то при доводочных работах рабочего процесса это вызыва-

ет неудобства, связанные с высокой трудоемкостью и временным фактором.

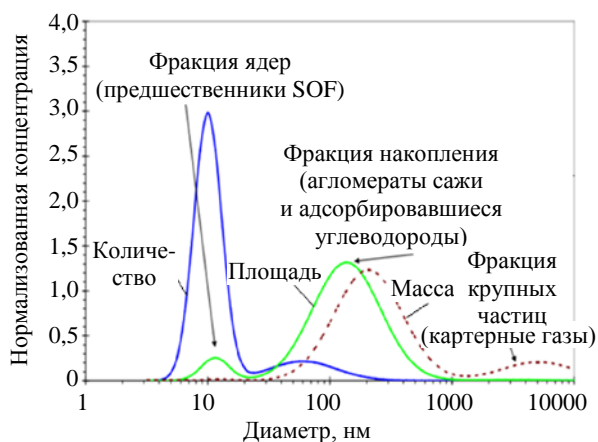


Рис. 4. Распределение фракций частиц
Fig. 4. Distribution of particle fractions

Ввиду этого ученые всего мира уже длительное время пытаются предложить методику измерения, точность которой приближалась бы к гравиметрическому методу, а скорость определения позволяла производить исследования на переходных режимах. Наибольшую популярность в исследовательских кругах получило направление поиска зависимостей между дисперсными частицами PM и дымностью N :

- формула Н. Hardenberg и Н. Albrecht [11]

$$PM = 0,349 \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{N}{100}} \right); \quad (1)$$

- формула И. В. Парсаданова [12]

$$PM = 0,0023N + 0,00005N^2 + 0,145e_{CH} + 0,33e_{CH}^2; \quad (2)$$

где e_{CH} – выброс углеводородов, г/ч;

- формула, полученная на основе данных, приведенных в статье А. Г. Иванова и Т. Р. Филиппосянца [13]:

$$PM = 0,000002629N^3 - 0,000232677N^2 + 0,010719579N; \quad (3)$$

- формула Ю.В. Гутаревича [14]

$$PM = 0,0001N^2. \quad (4)$$

Также исследованы зависимости определения частиц, mg/m^3 , от FSN:

- формула А. С. Alkidas [15]

$$PM = 565 \left[\ln \left(\frac{10}{10 - FSN} \right) \right]^{1,206}; \quad (5)$$

- формула G. G. Muntean [16]

$$PM = (-184FSN - 727,5) \log \left[1 - \frac{FSN}{10} \right]. \quad (6)$$

В последнее время для исследовательских работ ввиду снижения уровня выбросов большой популярностью пользуется метод определения дымности в FSN, оттесняя оптические дымомеры в область технической диагностики и первичной оценки показателей. В связи с этим особый интерес представляет зависимость расчета твердых частиц [17]

$$SC = \frac{1}{0,405} \cdot 4,95FSNe^{0,38FSN}. \quad (7)$$

Проанализировав вышеприведенные зависимости (рис. 5), можно отметить широкий диапазон варьирования результатов, полученных в различных лабораториях на разных объектах исследования независимо от методов определения дымности (оптического и FSN). Это объясняется различием фракционного состава дисперсных частиц.

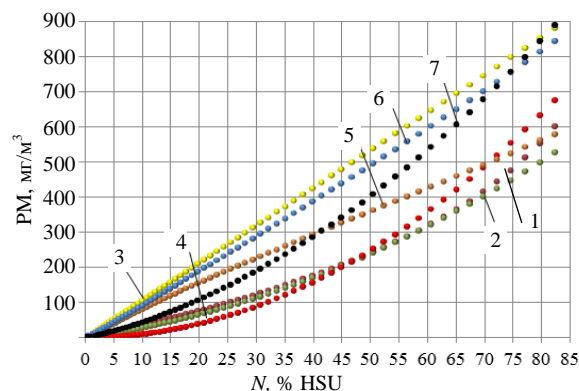


Рис. 5. Исследование расчетных зависимостей между частицами и дымностью

Fig. 5. Research of calculation dependence between particles and smokiness

Особенностью методики измерения дымомером является анализ горячей пробы, для чего организовывается подогрев как пробоотборни-

ков, так и измерительных камер. Судить при таком исследовании можно лишь о сажевой составляющей, являющейся основным источником оптической непрозрачности отработавших газов (ОГ).

Многофракционный состав дисперсных частиц, а также особенности образования каждой из фракций в выпускной системе транспортного средства требуют соблюдения всех условий их образования и в измерительной аппаратуре. В современных приборах для организации этих процессов применяются подходы частичнопоточного и полнопоточного разбавления пробы ОГ, реализуемые за счет электронного управления. При этом температура пробы на фильтре не должна согласно методике превышать 52 °С на любом режиме работы двигателя.

Для оценки методик измерения, реализованных в приборах SPC-472, AVL-439 и AVL-415, в ИЦ ОАО «УКХ «Минский моторный завод» проведены испытания четырехцилиндрового дизельного двигателя с турбонаддувом и охладителем наддувочного воздуха на режиме номинальной мощности 90 кВт при различных параметрах топливоподачи. Результаты измерений в зависимости от угла опережения впрыска топлива θ и давления впрыска $p_{впр}$ приведены на рис. 6, 7.

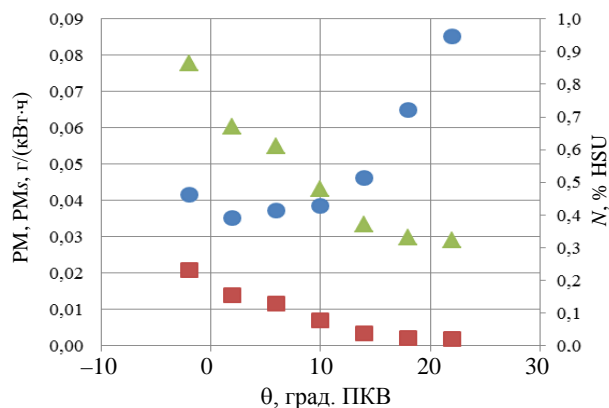


Рис. 6. Изменение выбросов частиц, сажи и дымности при $p_{впр} = 150$ МПа и различных значениях θ :
 ● – PM, SPC-472; ■ – PM_s, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Fig. 6. Changes in emissions of particles, soot and smokiness at $p_{injection} = 150$ MPa and various values of θ :
 ● – PM, SPC-472; ■ – PM_s, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Как видно из графиков на рис. 6, 7, при θ выше 10 град. поворота коленчатого вала (ПКВ) выброс дисперсных частиц резко увеличивается, несмотря на это, выброс сажи имеет нисходящий характер, а минимальный удельный эф-

фективный расход достигается при более высоком $\theta = 18$ град. ПКВ.

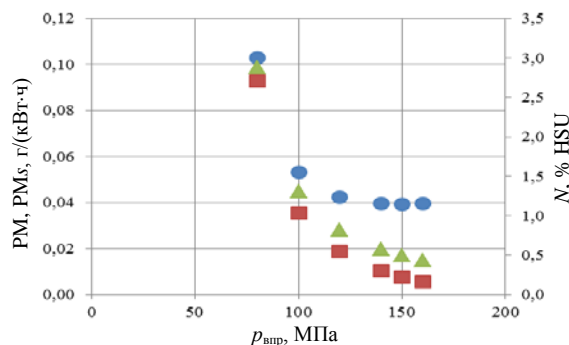


Рис. 7. Изменение выбросов частиц, сажи и дымности при $\theta = 10$ град. ПКВ и различных значениях $p_{впр}$:
 ● – PM, SPC-472; ■ – PM_s, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Fig. 7. Changes in emissions of particles, soot and smokiness at $\theta = 10$ degrees of crankshaft rotation and various values of $p_{injection}$:

● – PM, SPC-472; ■ – PM_s, AVL-415; ▲ – N, AVL-439

Следует отметить, что хоть уровень оптической дымности находится ниже 1 % HSU, точность результатов позволяет проследить общую тенденцию с показаниями, полученными по другой методике FSN. При изучении фильтров, полученных при измерении дисперсных частиц, также прослеживается тенденция осветления лицевой поверхности с ростом θ при одновременном повышении массы. Руководствуясь исследованиями фирмы AVL по измерению частиц (рис. 8), следует полагать, что рост растворимой органической фракции несгоревших углеводородов увеличивается с большей интенсивностью, чем снижается нерастворимая органическая фракция.

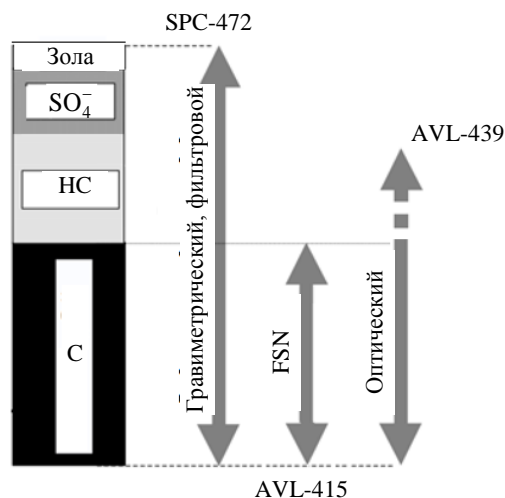


Рис. 8. Методы измерения и исследования твердых частиц

Fig. 8. Methods for measuring and investigation of solid particles

С увеличением давления впрыска уровень твердых частиц падает. Однако после давления впрыска более 140 МПа в данной комплектации двигателя эффективность снижения незначительна и при снижении уровня твердых частиц разница с дисперсными частицами увеличивается. При установке в выпускном тракте сетчатых элементов без покрытия драгоценными металлами и уловителей разница по выбросам существенно сокращается, что подчеркивает влияние конфигурации выпускной системы в образовании дисперсных частиц.

Таким образом, выброс сажи однозначно снижается при повышении эффективности цикла протекания процесса, что дает возможность с большой долей точности прогнозировать выбросы на основе характера протекания процесса в цилиндре в отличие от органической фракции, уровень которой первостепенно определяется интенсивностью процессов конденсации и коагуляции. Поэтому любые зависимости расчета дисперсных частиц, предложенные без учета протекания реакций образования растворимых фракций в системе выпуска, будут иметь значительную неопределенность.

Рост уровня выбросов дисперсных частиц с повышением θ , вопреки общепринятой тенденции на основе данных доводки дизельных двигателей низшего экологического класса, объясняется новым подходом увеличения преобладающей доли объемного смесеобразования, которое сопровождается увеличением диаметра горловины камеры сгорания и соответственно угла раскрытия топливных факелов. Поэтому применение ранней стратегии впрыска наравне с поздней при такой организации протекания рабочего процесса приводит к попаданию топлива на относительно холодные части вне камеры сгорания в поршне, стимулируя тем самым чрезмерное образование углеводородов.

При доводке рабочего процесса, с точки зрения снижения дисперсных частиц, необходимо выделить эффективный диапазон изменения параметров топливоподачи, в рамках которого преобладающим фактором является эффективность сгорания, в противном случае необходимо учитывать химические процессы в выпускном тракте. С учетом этого нужно отметить, что на характер протекания реакций в выпускной системе процесс сгорания в цилиндре

оказывает влияние лишь кинетикой газодинамического потока, характеризующейся расходом ОГ, температурой ОГ в конце сгорания и количеством несгоревших углеводородов, подвергающихся дальнейшим преобразованиям в зависимости от конструкции выпускной системы.

Как показали результаты испытаний, при корректировке диапазона границ изменения параметров топливоподачи и степени рециркуляции отработавших газов доля сажевых компонентов становится доминирующей, что соответствует мировым тенденциям. Это дает возможность использовать модель образования сажи как основного источника дисперсных частиц для прогнозирования выброса вредных веществ в процессе сгорания, а учесть химические процессы в выпускной системе при изменении регулировочных параметров можно на основании температуры в выпускной системе.

Получается, что контроль дымности для широкой гаммы транспортных средств с различной настройкой рабочего процесса двигателя при прохождении технического осмотра не отражает реального выброса дисперсных частиц, а может свидетельствовать только о техническом состоянии. Если говорить о современных двигателях с электронным управлением, то показатель «дым на разгоне» является легкодостижимым без выполнения основных показателей по выбросу вредных веществ. Воспроизвести же сами циклы испытания без специализированных беговых барабанов и стендов, стоимость которых не ограничивается 1 млн евро, вообще не представляется возможным. Таким образом, реальная экологическая обстановка в мире может действительно улучшиться только в том случае, если наряду с введением норм будут оговариваться адекватные методы и формы контроля, идентифицирующие изменение заводских настроек транспортных средств и свои систем, влияющих на выбросы вредных веществ.

ВЫВОДЫ

1. Достижение современных экологических норм связано главным образом с доводкой рабочего процесса двигателя. Процесс образования дисперсных частиц в дизелях не заканчивается камерой сгорания, а продолжается в

системе выхлопа и атмосфере. Процессы, происходящие на завершающей стадии образования, плохо коррелируются с оптической непрозрачностью. В связи с этим расчетные зависимости между дисперсными частицами и дымностью имеют значительную неточность.

2. Потенциал снижения выбросов вредных веществ определяется не только возможностью топливоподающей аппаратуры, агрегатов наддува и способами организации рециркуляции отработавших газов, но и выбором параметров топливоподачи и воздушного заряда на впуске с учетом конструктивной концепции организации процесса сгорания.

3. Чувствительность углеродной фракции частиц к показателям, характеризующим эффективность процесса сгорания, дает основание использовать способ оценки горячей пробы без разбавления как превалирующий при исследовании внутрицилиндровых процессов, ограничив диапазон значений управляющих параметров на основании анализа конструкции и предварительных испытаний.

4. Для определения пределов последующих проектов ограничений выбросов вредных веществ, а также анализа существующих необходимо при мониторинге окружающей среды различать частицы от сгорания в двигателе и элементов износа деталей транспортного средства.

5. Выявить вмешательство в системы двигателей высокого экологического класса, обеспечивающих регламентируемый выброс вредных веществ, посредством только тестов при периодическом государственном техническом осмотре проблематично. Поэтому, помимо введения новых экологических стандартов, необходимо совершенствовать методику контроля и проверки выбросов.

ЛИТЕРАТУРА

- Кабаева, И. В. О распространении и оседании пылевых частиц размером до 10 мкм в горизонтальном турбулентном потоке [Электронный ресурс] / И. В. Кабаева, А. Г. Шестаков, А. С. Артюхин // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2007. Вып. 2 (3). Режим доступа: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2-3-12_0507.pdf. Дата доступа: 21.04.2016.
- Единообразные предписания, касающиеся подлежащих принятию мер по ограничению выбросов загрязняющих газообразных веществ и взвешенных частиц из двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для использования на транспортных 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: Правила ЕЭК ООН № 49-06 / введ. 01.01.2015. Минск: Госстандарт; Минск: БелГИСС, 2014. 602 с.
- Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения двигателей с воспламенением от сжатия для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах в отношении выброса загрязняющих веществ этими двигателями: Правила ЕЭК ООН № 96-03, 1995. 502 с.
- О безопасности колесных транспортных средств: ТР ТС 018–2011: [принят 09.12.11; вступает в силу 01.01.15] / Евразийская экономическая комиссия. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2012. 273 с.
- О безопасности сельскохозяйственных и лесохозяйственных тракторов и прицепов к ним: ТР ТС 031–2012: [принят 20.07.2012; вступает в силу 15.02.2015] / Евразийская экономическая комиссия. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2013. 39 с.
- Кутенев, В. Ф. О реальном выбросе твердых частиц автомобильным транспортом / В. Ф. Кутенев, В. В. Степанов, В. К. Азаров // Журнал ААИ. 2013. № 4 (81). С. 45–47.
- Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust: Report EPA/600/8-90/057F. Washington (DC): National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. USA: Environmental Protection Agency, 2002. 669 p.
- PAH Content of Diesel Fuel and Automotive Emission: Research Report VTT-R-1155-06 / Päivi Aakko [et al.]. USA, 2006. 54 p.
- Heck, Ronald M. Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology / Ronald M. Heck, Robert J. Farrauto, Suresh T. Gulati. New York: Wiley, 2002. 391 p.
- Kittelson, D. Particle Formation and Models / D. Kittel-son, M. Kraft // Encyclopedia of Automotive Engineering. 2015. No 1 (23). P. 107–130.
- Hardenberg, H. Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen / H. Hardenberg, H. Albrecht // MTZ: Motortechn. Z. 1987. No 2. P. 51–54.
- Парсаданов, И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе топливно-экологического критерия / И. В. Парсаданов. Харьков: Изд-во Центр НТУ «ХПИ», 2003. 244 с.
- Филипосянц, Т. Р. К вопросу об ускоренных методах контроля и доводки дизелей по экологическим параметрам / Т. Р. Филипосянц, А. Г. Иванов // Экология двигателя и автомобиля: сб. науч. тр. НАМИ. М., 1998. С. 19–25.
- Экология автомобильных двигателей внутреннего сгорания / В. А. Звонов [и др.]. Луганск: ВНУ имени В. Даля, 2004. 268 с.
- Alkidas, A. C. Relationship Between Smoke Measurements and Particulate Measurements / A. C. Alkidas // SAE Technical Paper. 1984. No 840412. P. 316–322.

16. Muntean, G. G. A Theoretical Model for the Correlation of Smoke Number to Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust / G. G. Muntean // SAE Paper. 1999. No 1999-01-0515. P. 316–322.
17. Eine Neue Messmethodik der Bosch-Zahl Mit Erhoehter Empfindlichkeit / R. Christian [et al.] // MTZ. 1993. Vol. 54. № 1. P. 16–22.

Поступила 03.03.2016

Подписана в печать 04.05.2016

Опубликована онлайн 26.09.2016

REFERENCES

- Kabaeva I. V., Shestakov A. G., Artiukhin A. S. (2007) About Distribution and Settling of Dust Particles up to 10 μm -size in Horizontal Turbulent Flow. *Internet-Vestnik of VSUACE* [Internet-Bulletin of Volgograd State University of Architecture & Civil Engineering], 3 (2). Available at: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2-3-12_0507.pdf. (Accessed 21 April 2016) (in Russian).
- Uniform Provisions Concerning the Measures to be Taken Against the Emission of Gaseous and Particulate Pollutants from Compression-Ignition Engines and Positive Ignition Engines for Use in Vehicles. Regulation No 49-06 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE). Minsk, Gosstandart, 2014. 602 (in Russian).
- Uniform Provisions Concerning the Approval of Compression Ignition (C.I.) Engines to be Installed in Agricultural and Forestry Tractors and in Non-Road Mobile Machinery with Regard to the Emissions of Pollutants by the Engine. Regulation No 96-03 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), 1995. 502 (in Russian).
- TP TC 018–2011 [Technical Regulations of the Customs Union]. On Safety of Wheeled Vehicles. Minsk: Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2012. 273 (in Russian).
- TP TC 031–2012 [Technical Regulations of the Customs Union]. On Safety of Agricultural and Forestry Tractors and their Trailers. Minsk: Belarusian State Institute of Standardization and Certification, 2013. 39 (in Russian).
- Kutenev V. F., Stepanov V. V., Azarov V. K. (2013) About Actual Emission of Particulate Matter from Motor Vehicles. *AAE Journal* [Association of Automotive Engineers – Russia], 81(4), 45–47 (in Russian).
- Health Assessment Document for Diesel Engine Exhaust: Report EPA/600/8-90/057F. Washington (DC): National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. USA: Environmental Protection Agency, 2002. 669.
- Päivi Aakko, Tiina Harju, Markku Niemi, Leena Rantanen-Kolehmainen (2006) *PAH Content of Diesel Fuel and Automotive Emission*: Research Report VTT-R-1155-06. USA. 54.
- Ronald M. Heck, Robert J. Farrauto, Suresh T. Gulati (2002) *Catalytic Air Pollution Control: Commercial Technology*. New York, Wiley. 391.
- Kittelsohn D., Kraft M. (2015) Particle Formation and Models. *Encyclopedia of Automotive Engineering*, 23 (1), 107–130. DOI: 10.1002/9781118354179.auto161.
- Hardenberg H., Albrecht H. (1987) Grenzen der Rußmassbestimmung aus Optischen Transmessungen. *MTZ: Motor-technische Zeitschrift*, (2), 51–54.
- Parsadanov I. V. (2003) *Improvement of Quality and Competitiveness of Diesel Engines on the Basis of Fuel and Ecological Criterion*. Kharkiv, Publishing Centre of National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. 244 (in Russian).
- Filiposyants T. R., Ivanov A. G. (1998) On the Question of Accelerated Control Methods and Development of Diesel Engines in Accordance with Ecological Parameters. *Ekologiya Dvigatelia i Avtomobilia: Sb. Nauch. Tr. NAMI* [Ecology of Engine and Motor Vehicle: Collection of Research Papers. Central Research and Development Automobile and Engine Institute]. Moscow, 19–25 (in Russian).
- Zvonov V. A., Zaigraev L. S., Chernykh V. I., Kozlov A. V. (2004) *Ecology of Automotive Internal Combustion Engines*. Lugansk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. 268 (in Russian).
- Alkidas A. C. (1984) Relationship Between Smoke Measurements and Particulate Measurements. *SAE Technical Paper*, No 840412. 9. DOI: 10.4271/840412.
- Muntean G. G. (1999) A Theoretical Model for the Correlation of Smoke Number to Dry Particulate Concentration in Diesel Exhaust. *SAE paper*, No 1999-01-0515, 316–322.
- Christian R., Knopf F., Jaschek A., Schindler W. (1993) Eine Neue Messmethodik der Bosch-Zahl Mit Erhoehter Empfindlichkeit. *MTZ: Motortechnische Zeitschrift*, 54 (1), 16–22 (in German).

Received: 03.03.2016

Accepted: 04.05.2016

Published online: 26.09.2016