

Расчетно-экспериментальное определение выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей

А.Р. Кульчицкий, к.т.н., начальник «Центра испытаний двигателей»;
ОАО ВМТЗ, ГСКБ

Правила № 96 ЕЭК ООН (R96) в форме ГОСТ Р41.96-99 ограничивают величины удельных выбросов с ОГ дизелей не только традиционных для Российских стандартов — оксидов азота NO_x , оксида углерода CO и суммарных углеводородов C_nH_m , но и, впервые для нашей страны, дисперсных частиц PM (*Particle Matter*).

На основании проведенных теоретических исследований была разработана модель образования дисперсных частиц в отработавших газах дизелей. Результаты экспериментальных исследований удельного выброса PM (по 14 восьмиступенчатым циклам испытаний R96 трех моделей дизелей с различными регулировочными и конструктивными особенностями) показали хорошую сходимость с расчетами, выполненными по математической модели. Максимальное отклонение составило $\pm 8\%$ по 13 циклам и только по одному циклу — 35% . При этом были получены данные об относительном составе дисперсных частиц и характере изменения часового выброса основных составляющих PM на различных режимах работы дизелей.

Была проведена оценка достоверности расчетных данных, получаемых по моделям других авторов.

С 01.07.2000 г. в России введено прямое действие ряда международных стандартов, регламентирующих содержание вредных веществ (ВВ) в отработавших газах (ОГ) двигателей и автотранспортных средств. В частности, введены Правила № 96 ЕЭК ООН (R96) в форме ГОСТа Р41.96-99, которые в настоящее время распространяются на дизели мощностью 18–560 кВт, предназначенные для установки на лесные и сельскохозяйственные трактора и самоходную внедорожную технику. К последней относятся:

✓ строительное оборудование (колесные погрузчики, бульдозеры, гусеничные тракторы и погрузчики, внедорожные грузовики, гидравлические экскаваторы ...);

- ✓ промышленные компрессорные установки;
- ✓ лесопромышленная техника;
- ✓ дорожное оборудование (грейдеры, катки, асфальтоукладчики);
- ✓ самоходное сельскохозяйственное оборудование;
- ✓ вилочные погрузчики;
- ✓ снегоуборочное оборудование;
- ✓ наземное оборудование в аэропортах;
- ✓ самоходные краны,

а также другая подобная техника, список которой будет постоянно дополняться.

Указанный документ ограничивает величины удельных выбросов с ОГ дизелей не только традиционных для Российских стандартов ВВ — оксидов азота NO_x , оксида углерода CO и суммарных углеводородов C_nH_m , но и впервые для нашей страны — дисперсных частиц PM (*Particle Matter*). Последние представляют собой жидкие и твердые вещества, находящиеся в ОГ. Твердые — это сажа (С), зола и кокс топлива (ЗКТ), сульфатная зола масла MSO_4 , механические примеси в маслах (МП). Жидкие — это часть суммарных углеводородов, которые отличаются большим молекулярным весом C_nH_m , что обуславливает их конденсацию при понижении температуры ОГ.

Сажа — углерод, появившийся в результате крекинга молекул топлива под воздействием высоких температур и при отсутствии окислителя в локальных зонах камеры сгорания. Образование сажи, в первую очередь, определяется полнотой сгорания топлива, т. е. зависит от таких процессов, как распыливание топлива в камере сгорания, скорость его испарения и полнота перемешивания с окислителем. Большое влияние оказывает величина периода задержки воспламенения, определяющая количество топлива, перемешанного с окислителем до начала его горения. Этим показателем определяется соотношение количеств топлива, сгорающего по кинетическому и диффузионному механизмам [1]. Кстати, применение в бензиновых двигателях системы впрыска топлива в камеру сгорания приведет к увеличению сажеобразования в этих двигателях, поскольку большая доля топлива будет сгорать именно по диффузионному механизму.

Наличие золы и кокса в ОГ обусловлено фракционным составом топлива и определяет его несгораемый остаток. Зольность дизельного топлива допускается в пределах 0,01 % по массе, а коксумость 10 %-ного остатка — 0,2–0,3 % [2]. Согласно R96 содержание золы может достигать 0,01 %, а величина коксумости 10 %-ного остатка — 0,3 %. В маслах допускается от 0,015 до 0,025 % механических примесей [3].

Сульфатная зола MSO_4 (другое название — твердые сульфаты) — это средние соли серной кислоты, образующиеся в результате сгорания серы S , содержащейся в топливе. Причем M (в обозначении сульфатной золы) — это металлы, входящие в состав моющих присадок к маслам — барий Ba или кальций Ca , на основе других металлов (цинк, калий, натрий, магний, фосфор и т. д.), входящих в масла, образуются только растворимые сульфаты. Содержание Ca в масле 0,15–0,25 %, содержание Ba не нормируется [3] (согласно R96 масса присадок может доходить до 0,03 %). Содержание же S в топливе может доходить до 0,2–0,5% по массе [2] (согласно R96 содержание S в топливе должно находиться в достаточно узком диапазоне — 0,1–0,2%). Таким образом, образование твердых сульфатов обусловлено совместным наличием в продуктах сгорания как сернистых соединений, так и Ba и Ca . Схематично процесс образования твердых сульфатов представлен на схеме (рис. 1) [4].

- (1) $S_2 + O_2 \rightarrow$
- (2) $SO_2 + O_2 + Mл \rightarrow$
- (3) $к_1SO_3 + H_2O \rightarrow$
- (4) $H_2SO_4 \cdot к_2H_2O + M \rightarrow к_3MSO_4$

1. $t > 1400\text{ }^\circ\text{C}$	2. $540\text{ }^\circ\text{C} < t < 1400\text{ }^\circ\text{C}$
3. $140\text{ }^\circ\text{C} < t < 540\text{ }^\circ\text{C}$	4. $t < 140\text{ }^\circ\text{C}$

Рис. 1. Схема образования твердых сульфатов:

$к_1$, $к_2$ и $к_3$ — соответственно, коэффициенты конверсии SO_2 в SO_3 , гидратации H_2SO_4 и степени полноты реакции образования MSO_4 ;
 $Mл$ — любая молекула; M — Ba (Ca)

То есть на первой стадии, протекающей в камере сгорания двигателя в условиях высоких температур (не менее $1400\text{ }^\circ\text{C}$), идет процесс окисления (сгорания) S до сернистого ангидрида SO_2 . Процессы второй стадии (тримолекулярная реакция) проходят как в цилиндре двигателя, так и в выпускном патрубке в условиях более низких температур (от 1400 до $540\text{ }^\circ\text{C}$). Здесь SO_2 окисляется до серного ангидрида SO_3 , причем скорость реакции в газовой фазе невысокая и зависит не только от величины температуры, но и от наличия

катализатора, роль которого может выполнять железо. При снижении температуры процесса ниже $540\text{ }^\circ\text{C}$ (третья стадия) при взаимодействии SO_3 с парами H_2O (результат сгорания водорода топлива) идет образование серной кислоты H_2SO_4 . Причем вследствие гидратации одна весовая часть H_2SO_4 может присоединить от 5 до 10 частей воды. На четвертой стадии, которая определяется уже методикой измерения, при температуре ниже $140\text{ }^\circ\text{C}$ H_2SO_4 конденсируется и, реагируя с оксидами металлов M , образует твердые сульфаты MSO_4 . Степень полноты реакции может колебаться от 20 до 95 % и зависит как от наличия катализатора, так и от его вида (наиболее эффективным является платина).

Содержание углеводородов в ОГ, так же как и сажи, — результат неполного сгорания топлива и масла, т. е. обусловлено процессами топливоподачи, испарения, перемешивания и окисления, а также расходом масла на угар. Основой состава всех традиционных топлив (дизельного, бензина и керосина) и подавляющего числа альтернативных (как жидких, так и газообразных), а также смазочного масла являются углеводороды, поэтому их наличие в ОГ неизбежно. Не являются исключением даже такие топлива как водород H_2 , поскольку наличие смазочного масла всегда будет вносить свою долю углеводородов в состав отработавших газов.

Основным источником C_nH_m в продуктах сгорания являются пристеночные низкотемпературные зоны в камере сгорания, а также процессы подвпрыска и подтекания топлива из распылителя. Часть углеводородов даже при понижении температуры остается газообразными, а другие — высокомолекулярные C_nH_m — конденсируются при смешении с воздухом при попадании в атмосферу или в измерительную часть прибора. Исследование группового состава углеводородов, содержащихся в ОГ дизеля, показало влияние на него как скоростного, так и нагрузочного режимов (рис.2 [5]). В частности, было определено, что в углеводороды групп от C_4 и выше составляют 25–45 % от всех, находящихся в составе ОГ.

Таким образом, сокращение выброса PM связаны со следующими факторами:

- увеличение полноты сгорания топлива с целью снижения количества высокомолекулярных углеводородов, сажи, золы, кокса и твердых сульфатов;
- снижение расхода масла на угар с целью уменьшения выброса высокомолекулярных углеводородов, а также присадок к маслам;
- уменьшение содержания серы в топливе, механических примесей в маслах, зольности и коксумости топлива;

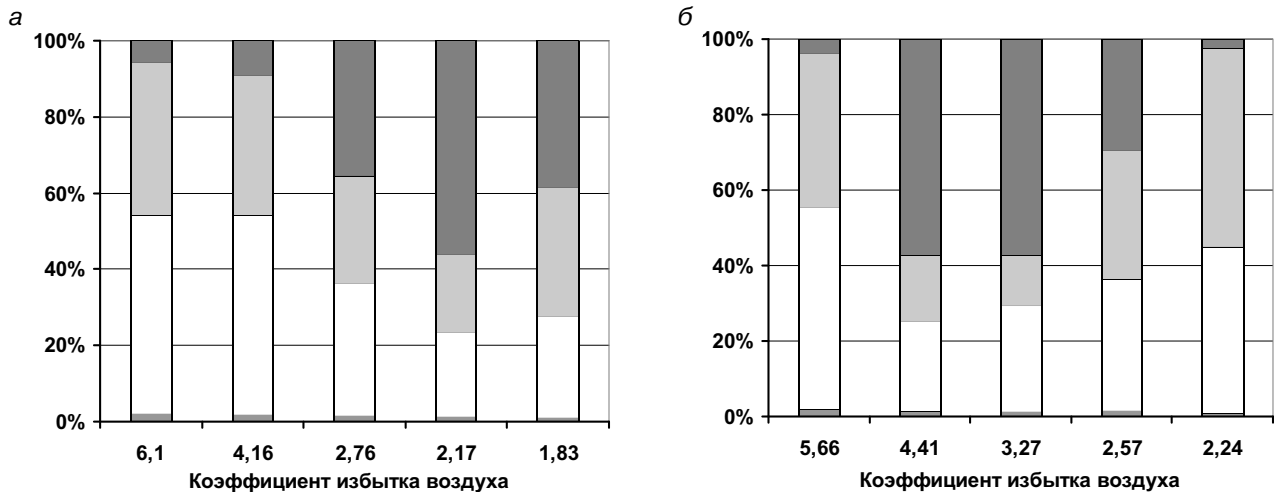


Рис. 2. Оценка группового состава углеводородов в ОГ дизеля с турбонаддувом в зависимости от коэффициента избытка воздуха на разных скоростных режимах:

а — частота вращения, соответствующая максимальному крутящему моменту;
б — номинальная частота вращения.

Относительное содержание групп углеводородов (снизу вверх) C_1 , C_2 , C_3 и всех остальных групп суммарно

• замена Ва и Са в присадках к маслам на другие вещества (рис. 3).

На основании проведенных теоретических исследований была разработана модель образования дисперсных частиц в ОГ дизелей. Оценка адекватности модели проводилась по данным испытаний в ФГУП НИЦИАМТ (г. Дмитров, Московская обл.) трех типов дизелей воздушного охлаждения производства ОАО «Владимирский моторо-тракторный завод» (ОАО ВМТЗ): четырех- и трехцилиндрового с наддувом; двухцилиндрового со свободным впуском воздуха. Все типы двигателей предназначены для применения на сельскохозяйственных тракторах и внедорожной технике. Сопоставление расчетных данных с результатами экспериментальных исследований по оценке удельного выброса РМ было проведено для 14 восьмиступенчатых циклов (R96) трех типов дизелей с различными регулировочными и конструктивными особенностями. Результаты сопоставления показали, что максимальное отклонение не превысило $\pm 8\%$ для 13 циклов и только по одному циклу составило $\pm 35\%$. При этом были получены данные об относительном составе дисперсных частиц (рис. 4) и характере изменения часового выброса основных составляющих РМ (рис. 5) на различных режимах работы дизелей.

Таким образом, на двигателях с турбонаддувом и свободным впуском воздуха, соответствующих, нормам первой и второй ступеней Правил № 96 ЕЭК ООН, доли высокомолекулярных углеводородов, сажи и твердых сульфидов

в составе дисперсных частиц являются функцией скоростного режима работы двигателя и особенностей организации рабочего процесса, и изменяются в достаточно широком диапазоне: C_nH_m — 20–80%, С — 10–50%, MSO_4 — 5–30%. Предлагаемая модель позволяет оценить эффективность снижения удельного выброса РМ в случае использования топлива с пониженным содержанием серы. Например, для дизеля с турбонаддувом снижение содержания серы с 0,14% (исходный вариант) до 0,05 и до 0,0% обеспечит уменьшение удельного выброса частиц на 12,6 и 19,7%, а для дизеля со свободным впуском воздуха — на 9 и 14,4% соответственно.

Адекватность разработанной модели экспериментальным данным позволила выполнить оценку достоверности расчетных данных, получаемых по моделям других авторов. Расчетно-экспериментальная оценка выброса дисперсных частиц с ОГ дизелей применяется многими исследователями [7]. Все применяемые модели можно разделить на две группы. Первая базируется на зависимости выброса РМ от величины сажевого содержания в ОГ [8, 10–13] и вторая на зависимости выброса РМ от величины сажевого содержания и концентрации суммарных углеводородов в ОГ [9, 14]. По первой группе моделей не учитывается наличие в РМ жидких компонентов (т. е. фактически принимается во внимание только твердая составляющая РМ), а по второй — степень разложения суммарных углеводородов на углеводороды различных групп. Это различие хорошо прослеживается при расчете концентрации РМ в ОГ по циклу

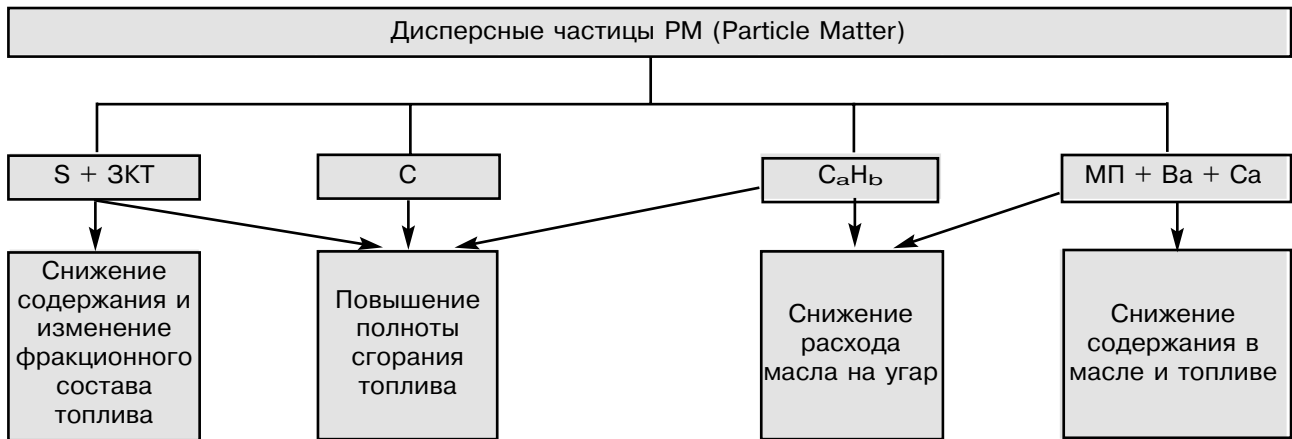


Рис. 3. Состав дисперсных частиц и мероприятия по снижению их содержания в отработавших газах дизелей

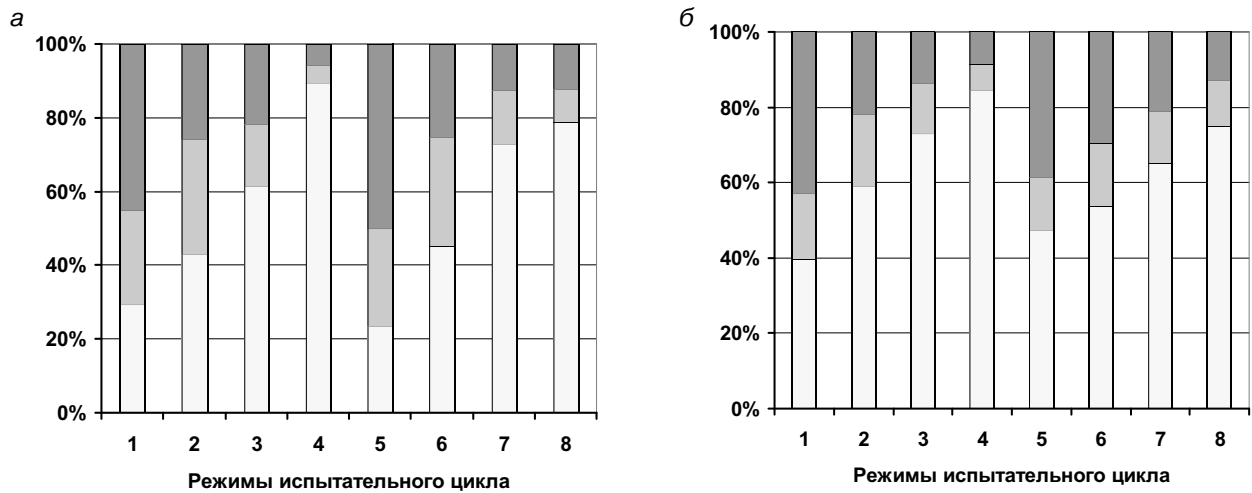


Рис. 4. Относительное содержание в дисперсных частицах (снизу вверх) высокомолекулярных углеводородов C_aH_b , твердых сульфатов MSO_4 и сажи C в ОГ дизеля с турбонаддувом (а) и со свободным впуском воздуха (б) на режимах 8-ступенчатого цикла испытаний по Правилам № 96 ЕЭК ООН

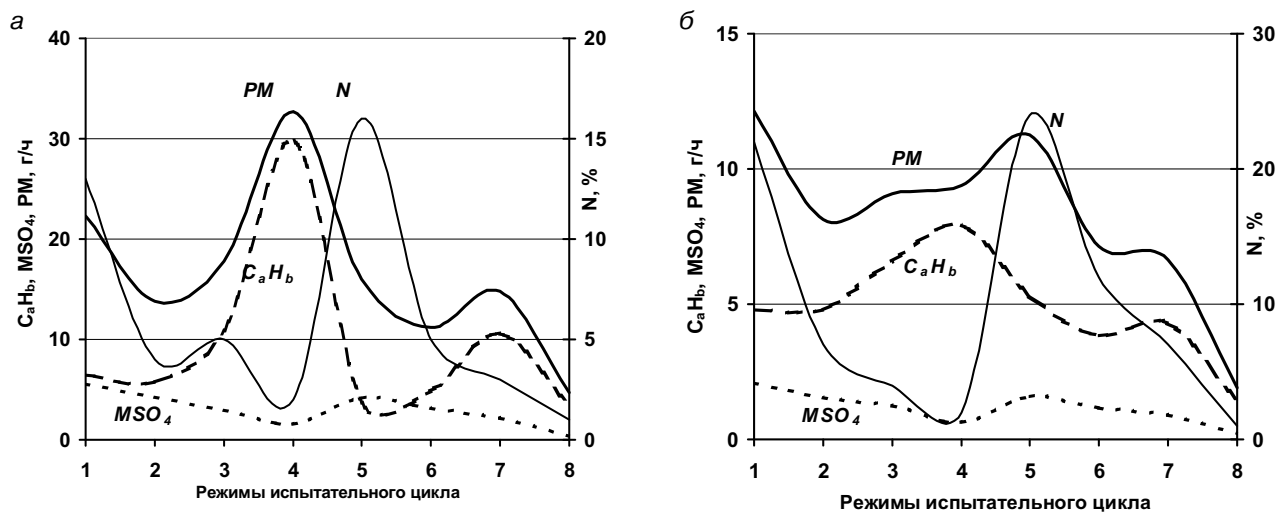


Рис. 5. Результаты расчетно-экспериментальной оценки массовых выбросов высокомолекулярных углеводородов C_aH_b , твердых сульфатов MSO_4 и дисперсных частиц PM и PM_3 , а также дымности N ОГ дизелей с турбонаддувом (а) и свободным впуском воздуха (б) на режимах 8-ступенчатого цикла по Правилам № 96 ЕЭК ООН

испытаний (рис. 6). Для двигателя со свободным впуском воздуха качественная картина для всех моделей одинакова и совпадает с экспериментальными данными, хотя количественная оценка по разным моделям различается существенно. Для двигателя с турбонаддувом правильная качественная картина получена только по тем моделям, которые учитывают влияние углеводородов на выброс РМ. Но по двум моделям из трех количественная оценка заметно отличается от экспериментальных данных, поскольку в них не учтена степень разложения суммарных углеводородов.

На основании проведенных расчетно-экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы.

1. На двигателях с турбонаддувом и свободным впуском воздуха относительное содержание в дисперсных частицах высокомолекулярных углеводородов, сажи (совместно с золой, коксом и механическими примесями) и твердых сульфатов изменяются в достаточно широком диапазоне: C_{aH_b} — 20–80%, С — 10–50 %, MSO_4 — 5–30 %.

2. Преимущества расчетно-экспериментальной оценки выбросов дисперсных частиц по косвенным данным заключаются:

- в сокращении времени оценки выбросов дисперсных частиц с ОГ дизелей (в 3–4 раза по сравнению с экспериментальным методом);
- возможности оценки как концентрации, так и массового выброса РМ на любом отдельно взятом режиме, в то время как стандартная методика измерения предусматривает необходимость измерения по всему циклу (на 8 или 13 режимах

Правил ЕЭК ООН № 96 и № 49-02);

- определении преимущественного влияния одного из составляющих компонентов РМ: высокомолекулярных углеводородов, сажи или твердых сульфатов;

- возможности оценки степени влияния изменения выбросов одного из компонентов РМ на итоговое значение удельного выброса РМ;

- обеспечении целенаправленной разработки мероприятия по улучшению экологических показателей двигателей благодаря возможности определения массового выброса частиц на каждом режиме цикла испытаний и по каждой составляющей РМ.

3. Использование расчетно-экспериментальных моделей определения выброса дисперсных частиц с ОГ дизелей, не учитывающих долевого содержание в суммарных углеводородах высокомолекулярных, снижает достоверность оценки выброса РМ, искажает качественную картину зависимости выброса РМ от нагрузки и скоростного режима, соответственно снижает эффективность разрабатываемых мероприятий по улучшению экологических показателей дизелей и автотранспортных средств.

4. При непосредственном контроле выбросов частиц требуются затраты времени на предварительную выдержку фильтров в течение нескольких часов (для стабилизации степени их влажности), холостую прогонку двигателя для получения данных по расходу воздушного заряда с целью настройки режимов измерения, заключительную выдержку фильтров (также с целью стабилизации их влажности) и их взвешивание. Столь сложная

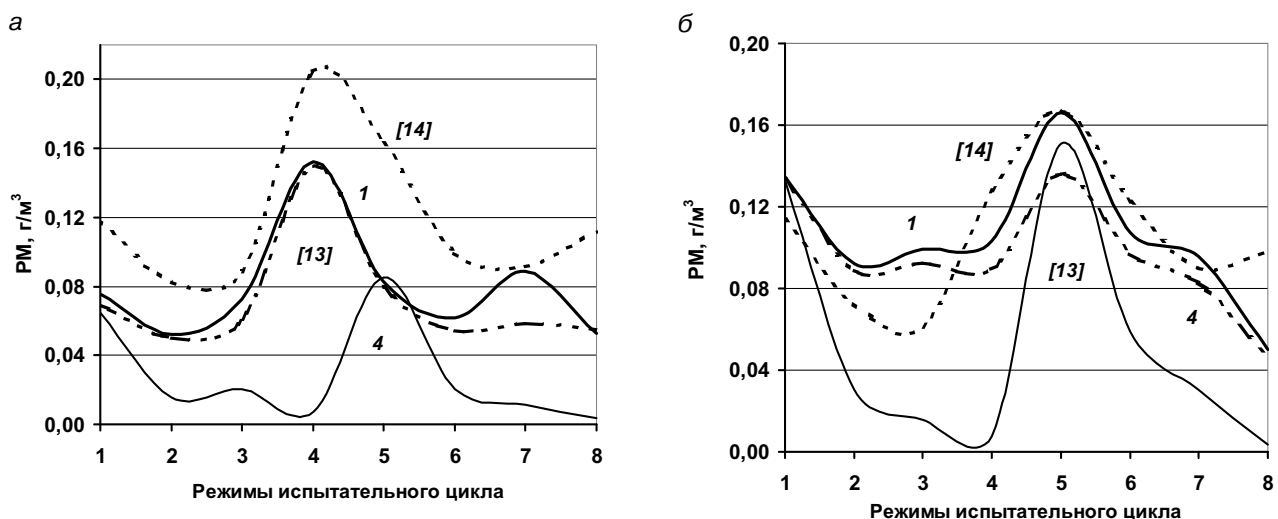


Рис. 6. Расчетно-экспериментальное определение концентрации дисперсных частиц в отработавших газах дизеля со свободным впуском воздуха (а) и с турбонаддувом (б) на режимах 8-ступенчатого цикла испытаний согласно Правилам № 96 ЕЭК ООН (ГОСТ Р41.96-99)

1 — экспериментальные данные, [13], [14] — по данным источников, 4 — разработанная модель

процедура экспериментальных исследований сама по себе является источником случайных и

систематических погрешностей и требует от экспериментатора высокой квалификации.

Автор выражает благодарность за помощь в подборе материала по расчетным моделям выброса дисперсных частиц с отработавшими газами дизелей д.т.н., профессору РУДН (Москва) В.М. Фомину.

Литература

1. Махов В.З., Гусаков С.В., Кульчицкий А.Р. Макрокинетические основы моделирования процесса образования окиси азота в дизеле // В кн. Рабочие процессы автотракторных ДВС: Сб. Всесоюзная науч. конф. (тезисы докладов) — М.: 1982. — С. 33–38.
2. ГОСТ 305-82 «Топливо дизельное»
3. ГОСТ 8581-78 «Масла моторные для автотракторных дизелей».
4. Хомченко И.Г. Общая химия. — М.: Химия. 1987. — 464 с.
5. Кульчицкий А.Р., Коротнев А.Г, Петров В.Л., Честнов Ю.И. Эмиссия углеводородов с отработавшими газами дизелей // Двигателестроение. — 2000, — № 2. — С. 37–39.
6. Горбунов В.В., Патрахальцев Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. — М.: Изд-во РУДН, — 1998. — 214 с.
7. Кульчицкий А.Р. К вопросу о расчетном определении эмиссии частиц с отработавшими газами дизелей // Двигателестроение. — 2000. — № 1.—С. 38–41.
8. Hardenberg H., Albrecht H. Grenzen der Rubmassbestimmung aus optischen Transmessungen // MTZ: Motortechn. Z. — 1987. — № 2. — P. 51–54.
9. Парсаданов И.В. Повышение качества дизелей на основе топливно-экологического критерия. — Харьков: Изд. Центр НТУ ХПИ. — 2003. — 244 с.
10. Филиповяц Т.Р., Иванов А.Г. К вопросу об ускоренных методах контроля и доводки дизелей по экологическим параметрам // Экология двигателя и автомобиля: Сб. научн. тр. НАМИ. — М.: 1998. — С. 19–25.
11. Звонов В.А., Заиграев Л.С., Черных В.И., Козлов А.В. Экология автомобильных двигателей внутреннего сгорания. — Луганск: ВНУ им. В. Даля. — 2004. — 268 с.
12. Alkidas A.C. Relationship between smoke measurements and particulate measurements // SAE Paper. —1984. — N 840412. — 9 p.
13. Muntean G.G. A theoretical model for the correlation of smoke number to dry particulate concentration in diesel exhaust // SAE paper. —1999. — N 1999-01-0515. —9 p.
14. Greeves G, Wang J.T. Origins of Diesel Particulate Mass Emissions // SAE Transactions. — 1981. — Vol. 90, — P. 1161–1172.

С прискорбием сообщаем
о скоропостижной кончине **20 августа 2005 года**
Генерального конструктора ОАО ХК «Барнаултрансмаш»,
члена редакционной коллегии журнала «Двигателестроение»

Юрия Серафимовича Червякова.

Ю.С. Червяков родился 6 января 1933 года. Окончил в 1956 году с отличием Алтайский институт сельскохозяйственного машиностроения (ныне Алтайский Государственный технический университет имени И.И. Позунова) и в течение немногим менее полувека трудился на Барнаульском заводе Транспортного машиностроения, пройдя большой путь от рядовых инженерных должностей до Генерального конструктора предприятия.

Им сделан значительный вклад в создание новых и модернизации выпускаемых образцов дизелей специального и гражданского применения, а также в освоении нетрадиционных для предприятия малоразмерных силовых установок и двигателей с альтернативными (газовыми) видами топлива.

Его заслуги отмечены высокими правительственными наградами, дипломами ВДНХ, присвоением почетного звания «Заслуженный машиностроитель России».

*Память о Юрии Серафимовиче Червякове, его деятельность как инженера и руководителя
надолго останутся в наших сердцах.*

Коллектив ОАО ХК «Барнаултрансмаш»

