

САЖЕОБРАЗОВАНИЕ В ДВС (по материалам конгресса CIMAC)

К числу вредных выбросов от судовых дизелей относятся NO_x , SO_x и твердые частицы. Нормативы IMO Tier II по выбросам NO_x вступившие в силу 01 января 2011, впоследствии были снижены до уровня Tier III. Что касается снижения выбросов частиц, то для этого были предприняты действия, направленные на снижение допустимого содержания серы в дизельном топливе. Нормы выбросов судовыми двигателями частиц, содержащих черный углерод, существенно снизились, особенно для высокооборотных регионов. Вот почему особенно важно понять механизмы образования и выброса частиц судовыми двигателями, а также влияние условий измерения на полученные результаты. В данном исследовании измерение массовой концентрации и распределение частиц по размерам производилось для двух типов судовых дизелей, а именно, для высокооборотного двигателя 3L13AHS мощностью 73,55 кВт и малооборотного двигателя 3UEC33LSII-Eco мощностью 1275 кВт. При этом измерение распределения частиц по размерам производилось двумя способами — методом горячего разбавления и методом разбавления с охлаждением. В первом случае отработавшие газы разбавлялись горячим воздухом. В испытаниях использовалось морское дизельное топливо двух типов — малосернистое (содержание серы 0,089 %) и высокосернистое (содержание серы 0,73 %). Массовая концентрация частиц измерялась с помощью системы разбавляющего туннеля (по ИСО 8178-1). При этом частицы с помощью экстрактора Сокслета разделялись на две группы — растворимые органические вещества (SOF — Soluble organic fraction) и нерастворимые органические вещества (ISF — Insoluble organic fraction). Размеры частиц определялись с помощью сканирующего измерителя подвижности частиц (SMPS — Scanning mobility particle sizer) и электрического импактора низкого давления (ELPI — Electric low pressure impactor). Исследовалось влияние степени разбавления ОГ и температуры разбавляющего воздуха на распределение частиц по размерам и их массовую концентрацию. При этом были получены следующие результаты.

1. При измерениях с помощью SMPS в условиях эксперимента диаметр частиц не превышал 100 нм.
2. При сравнении распределения частиц по размерам, измеренного методом горячего разбавления и методом разбавления с охлаждением, установлено возникновение капель летучих компонентов внутри разбавительного туннеля.
3. В двухтактных двигателях при повышении нагрузки размеры частиц увеличиваются, что можно объяснить их коагуляцией, вызванной броуновским движением.
4. В случае использования ELPI распределение частиц по размерам носит бимодальный характер, выявляемый при анализе весовой концентрации.
5. Количество частиц диаметром до 100 нм в отработавших газах четырехтактных двигателей выше, чем в двухтактных.

Проблема глобального потепления, вызванная выбросами в атмосферу двуокиси углерода при сжигании минерального топлива требует принятия срочных мер. Не менее серьезную проблему представляет собой истощение ресурсов ископаемого топлива, в связи с

чем вызывает интерес использование в качестве альтернативы биотопливо из растительных масел. Выполнены многочисленные систематические исследования, связанные с изучением экономических и экологических характеристик двигателей, работающих на биодизеле, а также особенности сгорания таких биотоплив, как метиловый эфир пальмового масла (PME), метиловый эфир кокосового масла (CME) и метиловый эфир рапсового масла (RME). Однако, поскольку биодизель состоит из нескольких видов метилового эфира жирных кислот (FAME), определить основные факторы, влияющие на характеристики сгорания биодизеля довольно трудно. Поэтому в настоящей работе исследовались несколько видов FAME, входящих в состав биодизеля. С целью более детального изучения этих характеристик использовалась визуализация факела сгорания биодизеля в специальной камере сгорания постоянного объема под высоким давлением. Температура пламени и концентрация сажи анализировались двухцветной оптической пирометрии методом светящегося излучения пламени. Необходимые условия внутри камеры сгорания — высокое давление и высокая температура — создавались за счет сжигания водорода в обогащенной кислородом смеси с воздухом. Состав смеси подбирался таким образом, чтобы к концу сгорания водорода концентрация кислорода в камере оказалась на заранее заданном уровне. По окончании сгорания водорода в камеру впрыскивалось топливо, в момент, когда давление в нем достигало заданного уровня, при этом регистрировалось излучение горящего факела. Для подачи топлива использовалась разработанная авторами аккумуляторная система впрыска с электронным управлением. Давление и температура в камере устанавливались на уровне 3 МПа и 985 К соответственно. Регистрация процесса горения факела производилась с помощью высокоскоростной цветной видеосъемки, а двумерное распределение температуры и сажи в пламени определялись с помощью двухцветной оптической пирометрии. В настоящей работе исследовались следующие виды FAME: метиловый эфир лауриновой кислоты, метиловый эфир олеиновой кислоты, метиловый эфир линоленовой кислоты, основные компоненты CME, PME and RME. Кроме того исследовался еще один вид биодизеля, а именно, метиловый эфир масла из семян каучука. Основываясь на данных систематического экспериментального изучения горения смесей с различным содержанием исследуемого FAME. Получены характеристики их воспламенения и сгорания. Было установлено, что при температуре в камере порядка 1000 К вид топлива и содержание FAME в смеси на задержку самовоспламенения почти не влияют. Несмотря на то, что температура пламени заметно падает при снижении содержания кислорода в камере, ее изменения в зависимости от вида топлива и содержания FAME очень малы. По сравнению с дизелем при сгорании FAME образуется меньше сажи вследствие большого содержания в их составе кислорода. При этом сажеобразование зависит от вида топлива. При уменьшении концентрации кислорода в смеси сажеобразование увеличивается, однако это увеличение не столь интенсивно даже при малом количестве кислорода в камере вследствие высокого его содержания в составе FAME

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ: ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

*Hidetsugu Sasaki, Tatsuro Tsukamoto,
Tokyo University of Marine Science and Technology*

Введение

Благодаря высокому КПД дизели стали основным видом энергетических установок на судах. В то же время они являются источником

вредных выбросов, таких как NO_x , SO_x и твердые частицы (PM). Последние оказывают особенно сильное негативное воздействие на здоровье людей и окружающую среду.

В последнее время установлено, что неблагоприятное воздействие на человеческий организм оказывают мелкие частицы. Поэтому особое значение приобретают вопросы измерения распределения частиц по размерам и их численной

концентрации. Для этого используются системы измерения с разбавляющим тоннелем, регламентированные стандартом ИСО 8178-1[1].

Согласно методике ИСО 8178-1, твердые частицы, содержащиеся в отработавших газах собираются на бумажном фильтре, после чего измеряется их весовая концентрация. Частицы делятся на растворимую и нерастворимую органические фракции (соответственно SOF и ISF). РМ в отработавших газах судовых двухтактных двигателей содержат большое количество летучих веществ и отличаются высокой концентрацией SOF [2]. Также большое количество SOF содержат РМ отработавших газов четырехтактных двигателей, работающих в качестве приводов дизель-генераторов [3]. Как установлено, большая часть SOF состоит из летучих веществ, которые при нормальных атмосферных условиях конденсируются. Концентрация и распределение частиц по размерам сильно зависят от агрегатного состояния летучих веществ, что при измерениях количества РМ необходимо учитывать [4, 5]. При охлаждении отработавших газов, содержащих летучие вещества, имеет место нуклеация (зарождение капель). При достаточно большой концентрации летучих веществ нуклеация происходит и без охлаждения. При разбавлении ОГ ситуация меняется [6]. Для снижения влияния нуклеации на результаты измерений используется метод высокотемпературного (горячего) разбавления, который характеризуется большой степенью разбавления ОГ горячим воздухом. При использовании системы разбавляющего тоннеля отработавшие газы разбавляются и охлаждаются воздухом нормальной температуры, а степень разбавления достаточно низкая. Интенсивная нуклеация происходит в разбавляющем тоннеле. В ходе настоящего исследования выполнялись измерения концентрации РМ и распределения по размерам частиц, содержащихся в отработавших газах судовых двигателей. В этих экспериментах были задействованы два типа двигателей: двухтактный малооборотный судовой двигатель 3UEC33LSII-Eco и четырехтактный высокооборотный судовой двигатель 3L13AHS. Для измерения РМ использовались два метода разбавления отработавших газов: стандартный метод разбавляющего тоннеля и метод горячего разбавления. В качестве топлива использовались морское дизельное топливо (МДО) и малосернистое топливо.

**Опытная установка и методика эксперимента
Двигатели, использованные в экспериментах
Двухтактный судовой дизель**

Технические характеристики двухтактного двигателя приведены в табл. 1. Дизель типа 3UEC33LSII-Eco был разработан «Mitsubishi

Таблица 1

**Технические характеристики стендового двигателя
(двухтактный судовой дизель)**

Тип двигателя	3UEC33LSII-Eco
Диаметр цилиндра, мм	330
Ход поршня, мм	1050
Число цилиндров	3
Номинальная мощность, кВт	1275
Номинальная скорость, об/мин	162



**Рис. 1. Двигатель для испытаний
типа 3UEC33LSII-Eco**



Рис. 2. Машинное отделение

Heavy Industries» и построен «Akasaka Diesels» (Япония). Максимальная мощность этого трехцилиндрового двигателя составляет 1275 кВт при 162 об/мин. Системы топливоподдачи, смазки цилиндров и привода выпускных клапанов этого дизеля имеют электронное управление. Двигатель установлен на испытательном стенде. На рис. 1 и 2 соответственно показаны фото двигателя и машинного отделения.

Судовой четырехтактный дизельный двигатель

В табл. 2 приведены технические характеристики четырехтактного испытательного двигателя модели 3L13AHS изготовленного «Niigata power systems» (Japan). Это трехцилиндровый двигатель мощностью 73,55 кВт при 1200 об/мин.

Таблица 2

Технические характеристики стендового двигателя (четырёхтактный судовой дизель)

Тип двигателя	3L13AHS
Диаметр цилиндра, мм	130
Ход поршня, мм	160
Число цилиндров	3
Номинальная мощность, кВт	73,55
Номинальная скорость, об/мин	1200



Рис. 3. Экспериментальный двигатель (3L13AHS)

Общий вид двигателя на испытательном стенде показан на рис. 3.

Общая характеристика системы измерения РМ Метод разбавляющего тоннеля

На рис. 4 показана схема экспериментальной установки, в основе которой лежит метод разбавляющего тоннеля. Метод состоит в том, что измеряется вес и плотность РМ с помощью фильтра, а также измерение распределения частиц по размерам. Часть отработавших газов двигателя подается в разбавляющий тоннель через подводящую трубку. После очистки разбавляющего воздуха с помощью высокоэффективного фильтра частиц (HEPA) он поступает в тоннель, где смешивается с отработавшими газами. Степень разбавления рассчитывается по соотношению концентрации CO₂ в отработавших

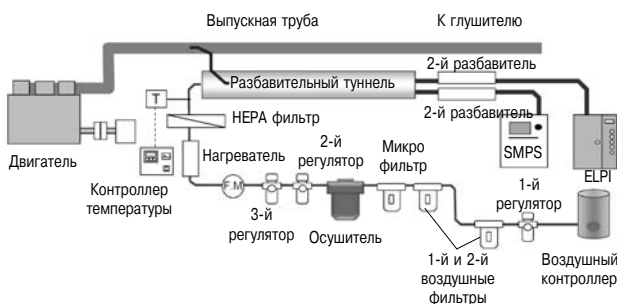


Рис. 4. Экспериментальная установка с разбавительным туннелем

газах до и после разбавления. Измерение концентрации CO₂ выполняется недисперсным инфракрасным детектором-измерителем (CGT-7000, Shimadzu).

Весовая концентрация РМ измерялась методом разбавляющего тоннеля в соответствии с ИСО 8178-1. Разбавленные отработавшие газы подаются в корпус фильтра, где частицы РМ собираются на фильтре, выполненном из боросиликатной микрофибры, усиленной PTFE. Вес РМ вычисляется как разность веса фильтра до и после фильтрации.

Для измерения распределения частиц РМ по размерам использовались: измеритель SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), диапазон размеров частиц 10,4–469,8 нм, разрешение — 54 канала, и импактор (Electrical Low Pressure Impactor, DEKATI), диапазон размеров частиц 29–100.10 нм, разрешение — 12 ступеней. SMPS классифицирует частицы по их диаметру и подвижности. Он состоит из дифференциального анализатора подвижности (DMA — Differential Mobility Analyzer) и счетчика конденсации частиц (Butanol CPC — Condensation Particle Counter). Затем численная концентрация частиц измеряется с помощью CPC. ELPI состоит из коронного разрядника, 12-ступенчатого импактора низкого давления и многоканального электрометра. Частицы разделяются по размерным диапазонам в зависимости от их аэродинамического диаметра в импакторе низкого давления. В процессе измерения размеров частиц отработавшие газы разбавляются дважды, сначала — в разбавляющем тоннеле, затем — в дилуторе. Во вторичном дилуторе используется эжекторная система разбавления FPS-4000, DEKATI.

Метод горячего разбавления

На рис. 5 показана опытная установка для измерения частиц методом горячего разбавления, который заключается в том, что для разбавления отработавших газов используется аппарат с вращающимся диском (типа MD19-3E производства Matter aerosol). Часть отработавших газов отбирается и отводится в устройство разбавления через соединительную трубку с гибким обогревателем, обеспечивающим изоляцию и нагрев отводимых

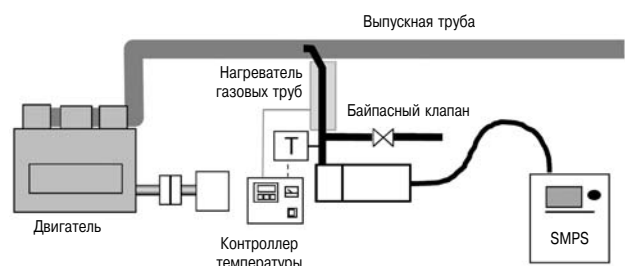


Рис. 5. Экспериментальная установка для измерения частиц методом горячего разбавления

газов. Температура разбавляющего воздуха в устройстве равна 423 К. Измерение распределения частиц по размерам и их концентрации производится с помощью SMPS.

Топливо

В испытаниях использовалось топливо двух видов: малосернистое MDO с содержанием серы 0,09 % и высокосернистое MDO с содержанием серы 0,73 %. Технические характеристики топлив приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики топлива

	MDO (мало- сернистое)	MDO
Удельная плотность (при 288 К), г/см ³	0,869	0,873
Кинетическая вязкость (при 323 К), мм ² /с	2,717	2,749
Зольность, % массы	0,001	0,001
Содержание серы, % массы	0,09	0,73
Высшая теплотворная способность, кДж/кг	45 220	44 940

Результаты исследования PM в отработавших газах двухтактного судового дизеля

Весовая концентрация PM в отработавших газах

Концентрация PM в отработавших газах судового двухтактного дизеля измерялась при нагрузках 25, 50, 75 и 100 %. Измерения выполнялись с использованием разбавляющего тоннеля при работе двигателя на MDO. Изменение концентрации PM в отработавших газах в зависимости от нагрузки двигателя показано на рис. 6. По оси абсцисс отложена нагрузка двигателя, а по оси ординат — вес PM, в кубометре отработавших газов при нормальных условиях. При увеличении нагрузки концентрация PM соответственно растет, достигая максимума при нагрузке 75 %, затем она начинает падать.

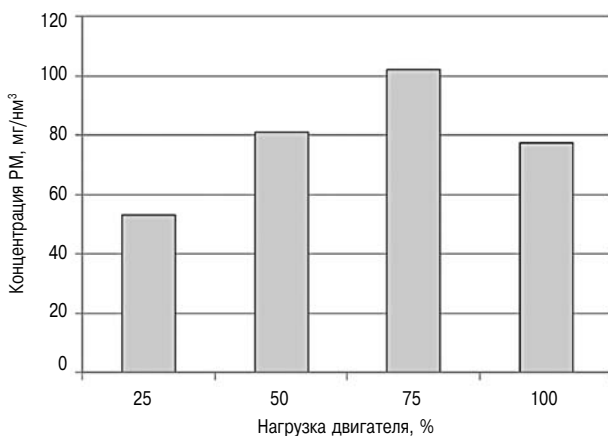


Рис. 6. Изменение концентрации PM в зависимости от нагрузки двигателя

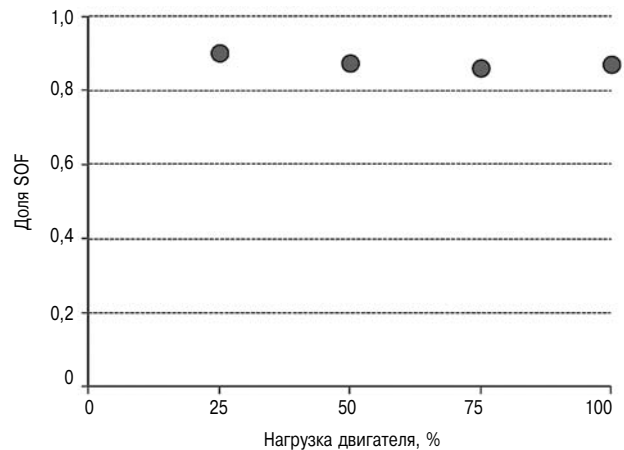


Рис. 7. Изменение доли SOF в PM в зависимости от нагрузки двигателя

На рис. 7 показано изменение долей SOF в PM в зависимости от нагрузки двигателя. Эта доля остается высокой во всем диапазоне нагрузок двигателя. В двухтактных судовых двигателях она, как правило, превышает 0,8.

Распределение по размерам PM содержащихся в отработавших газах

Размерное распределение частиц PM, содержащихся в отработавших газах двухтактного судового дизеля, измерялось методом горячего разбавления. Степень разбавления изменялась в пределах от 200 до 1000, при этом температура воздуха для разбавления поддерживалась на уровне 423 К.

На рис. 8 показано соотношение между размером частиц и концентрацией PM в отработавших газах при нагрузке двигателя 25 %. Диаметр большинства частиц в отработавших газах не превышает 100 нм. Максимальное значение концентрации увеличивается с ростом степени разбавления. Это объясняется тем, что повышение степени разбавления способствует нуклеации

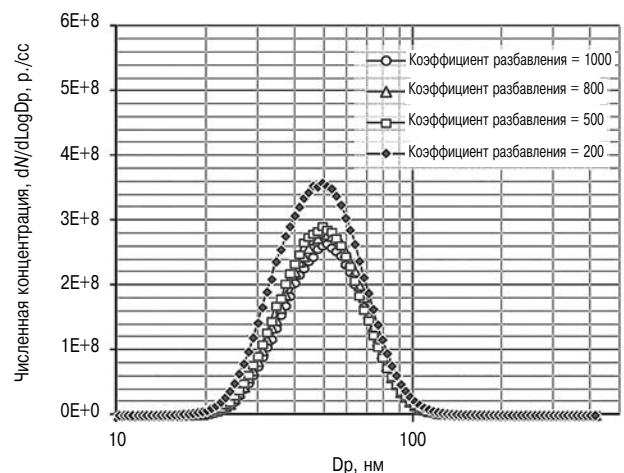


Рис. 8. Соотношение между размерами частиц и концентрацией PM при нагрузке 25 %

летучих фракций. Характеристический диаметр, при котором концентрация достигает максимума, составляет примерно 50 нм.

На рис. 9 показано соотношение между размером частиц и численной концентрацией РМ в отработавших газах при нагрузке 100 %. Диаметр частиц не превышает 200 нм. При уменьшении степени разбавления максимальная величина численной концентрации возрастает. Модальный диаметр частиц при нагрузке 100 % составляет порядка 70 нм, т. е. больше, чем при нагрузке 25 %.

Численная концентрация РМ диаметром менее 450 нм измерялась с помощью SMPS. На рис. 10 показано изменение общей численной концентрации (PN) РМ в отработавших газах двухтактного дизеля в зависимости от нагрузки двигателя. Общая численная концентрация изменялась методом горячего разбавления. Степень разбавления отработавших газов составляла 1000 при температуре разбавляющего воздуха 423 К. При использовании метода горячего разбавления

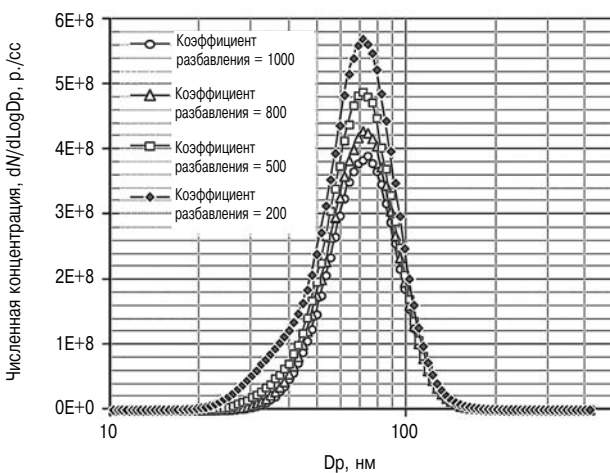


Рис. 9. Соотношение между размерами частиц и численной концентрацией РМ при нагрузке 100 %

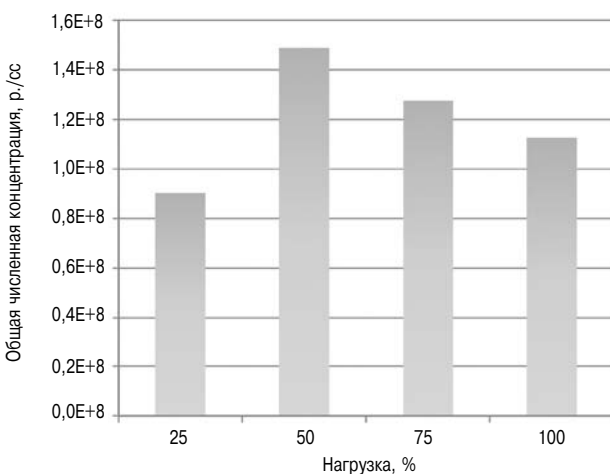


Рис. 10. Изменение общей численной концентрации РМ в зависимости от нагрузки двигателя

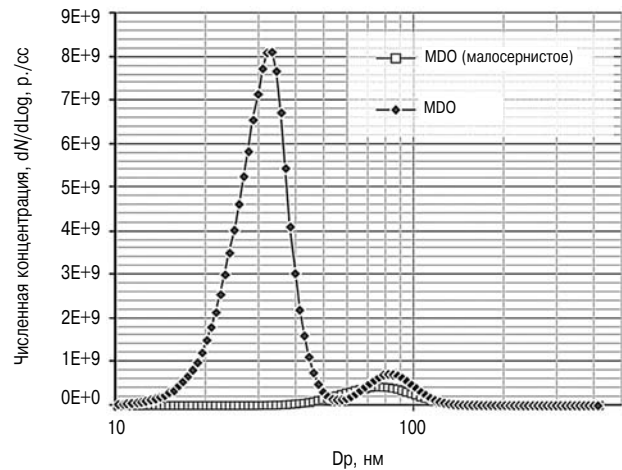


Рис. 11. Соотношение между размером частиц и численной концентрацией РМ

на результаты измерений оказывает влияние броуновская коагуляция, поэтому они отличаются от вышеупомянутых результатов измерения массовой концентрации.

На рис. 11 показано соотношение между размером частиц и численной концентрацией РМ в отработавших газах двухтактного дизеля при работе на двух видах топлива (MDO ($S = 0,73 \%$), малосернистое MDO ($S = 0,09 \%$)). В эксперименте нагрузка двигателя составляла 75 %, а численная концентрация изменялась методом горячего разбавления. Степень разбавления отработавших газов составляла 1000 при температуре разбавляющего воздуха 423 К.

Распределение численной концентрации при работе двигателя на MDO показывает, насколько значителен этот показатель по сравнению с работой на малосернистом MDO. Следует отметить, что распределение имеет два пика, один — для частиц размером порядка 30 нм, второй — для частиц размером порядка 80 нм. При работе на малосернистом MDO распределение носит одно-модальный характер, размером частиц — порядка 80 нм. Этот диаметр совпадает с диаметром частиц на большем пике при работе на MDO. Результаты эксперимента показывают, что содержание серы в топливе оказывает заметное влияние на результаты измерения численной концентрации РМ.

Измерение распределения численной концентрации частиц с помощью ELPI

Отбор проб отработавших газов дизеля производится методом разбавляющего тоннеля. Классификация частиц по аэродинамическому диаметру производилась с помощью импактора ELPI. Распределение концентрации РМ по размерам частиц определялось при четырех значениях нагрузки двигателя.

На рис. 12 показано соотношение между размерами частиц и их численной концентрацией,

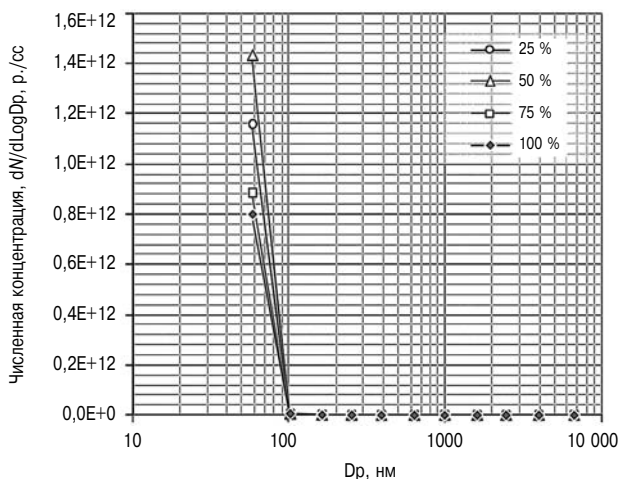


Рис. 12. Соотношение между размерной и численной концентрациями PM, измеренными с помощью ELPI

измеренными с помощью ELPI. Степень разбавления ОГ (в разбавляющем тоннеле) составляла примерно 10. Степень разбавления во вторичном разбавляющем устройстве была задана на уровне порядка 85. Размеры PM в отработавших газах двухтактного судового дизеля оставались в пределах 100 нм при всех значениях нагрузки. Численная концентрация PM размером более 100 нм была незначительной. Затем численная концентрация была пересчитана в массовую, в предположении, что все частицы имеют форму идеального шара, а их плотность составляет 1,0 г/см³. Соотношение между размерной и массовой концентрациями PM показано на рис. 13.

Поскольку мелкие частицы весят мало, а крупные много, крупные PM даже в малой концентрации обладают значительным весом. Кроме того, распределение по массовой концентрации является бимодальным.

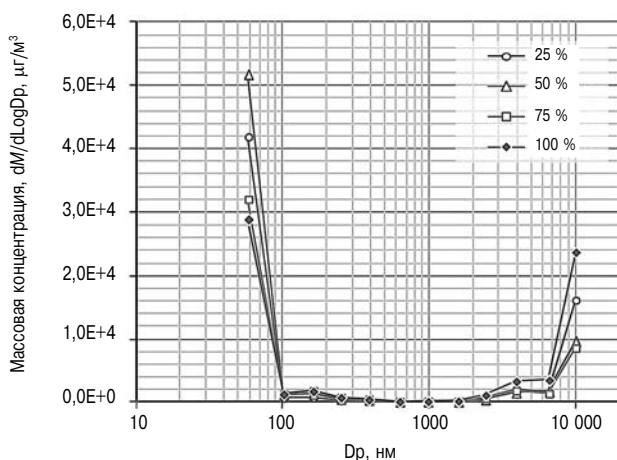


Рис. 13. Соотношение между размерной и массовой концентрациями PM, измеренными с помощью ELPI

PM в отработавших газах судового четырехтактного дизеля

Измерение распределения частиц PM методом разбавляющего тоннеля

Распределение частиц PM измерялось с использованием SMPS разбавляющего тоннеля. Температура разбавляющего воздуха последовательно устанавливалась на уровне 293, 303 и 313 К. Двигатель работал в генераторном режиме на скорости 1200 об/мин, нагрузка составляла 30 и 75 %. Распределение концентрации PM по размерам частиц определялось с помощью SMPS для обоих значений нагрузки (рис. 14 и 15 соответственно). В данном случае степень разбавления ОГ (в разбавляющем тоннеле) равна 12, а для вторичного разбавления использовано устройство с вращающимся диском. При снижении температуры разбавляющего воздуха максимальное значение численной концентрации повышается (см. рис. 14).

Распределение частиц по размерам является мономодальным, а диаметр частиц при любой температуре разбавляющего воздуха равен примерно 40 нм. Распределение частиц по размерам при нагрузке двигателя 75 % является бимодальным (см. рис. 15).

Численная концентрация частиц, соответствующая их диаметру при меньшем пиковом значении, уменьшается по мере роста температуры разбавляющего воздуха, тогда как численная концентрация частиц диаметром 100 нм и более остается неизменной. PM, содержащиеся в отработавших газах при нагрузке 30 % (в генераторном режиме), содержат значительно больше SOF, чем при нагрузке 75 %. Поэтому PM, измеренные при нагрузке 30 %, являются нуклеационными, а PM, измеренные при нагрузке 75 %, содержат, кроме того, аккумуляционные частицы.

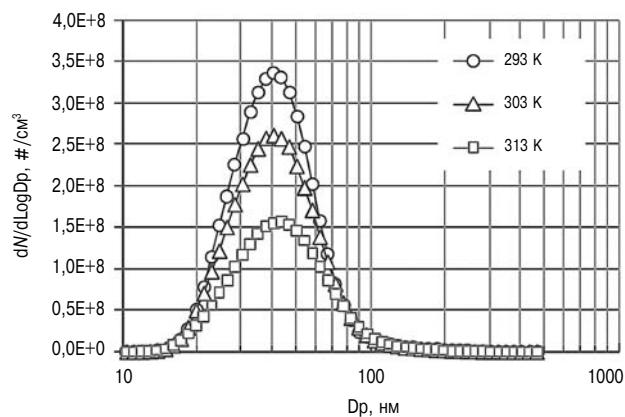


Рис. 14. Распределение частиц по размерам, измеренным с помощью SMPS:

нагрузка — 30 %, степень разбавления (в разбавительном тоннеле) — 12

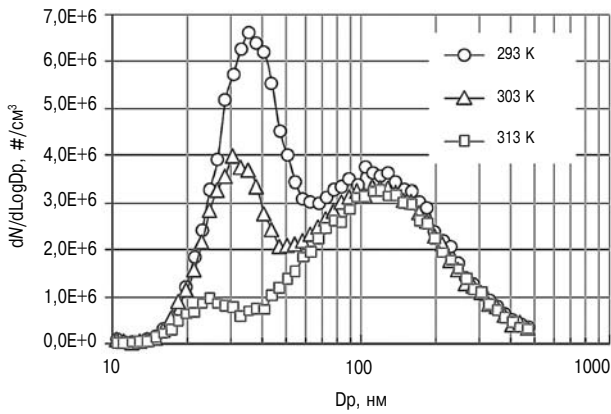


Рис. 15. Распределение частиц по размерам, измеренное с использованием SMPS:

нагрузка двигателя — 75 %; степень разбавления (в разбавляющем туннеле) — 12

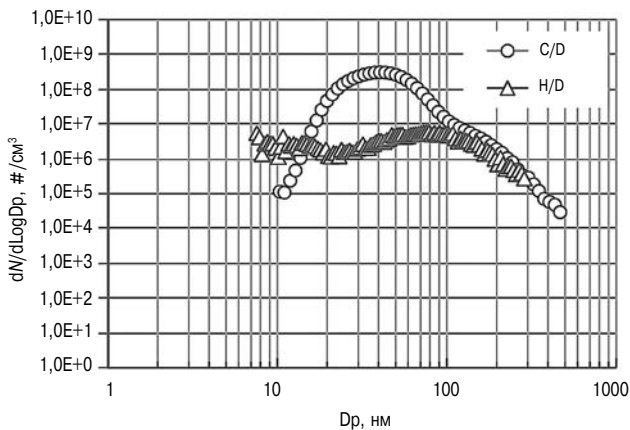


Рис. 16. Распределение частиц по размерам, измеренное с помощью SMPS:

нагрузка двигателя — 30 %; степень разбавления (в разбавительном туннеле) — 12)

Для сравнения результатов измерения частиц, выполненных методами горячего разбавления и разбавительного туннеля, были проведены измерения распределения по размерам частиц методом горячего разбавления с помощью SMPS. На рис. 16 показано размерное распределение частиц, измеренных с помощью SMPS методом разбавительного туннеля (C/D) и методом горячего разбавления (H/D). Ось абсцисс является на рисунке логарифмической. Для частиц диаметром 100 нм и более результаты измерения численной концентрации методами горячего разбавления и разбавительного туннеля практически одинаковы. Считается, что частицы диаметром менее 100 нм являются нуклеационными частицами, конденсирующимися в разбавляющем туннеле.

Сравнение распределений частиц по размерам, содержащихся в отработавших газах двухтактного и четырехтактного дизелей

Проведено сравнение распределений частиц по размерам, содержащихся в отработавших

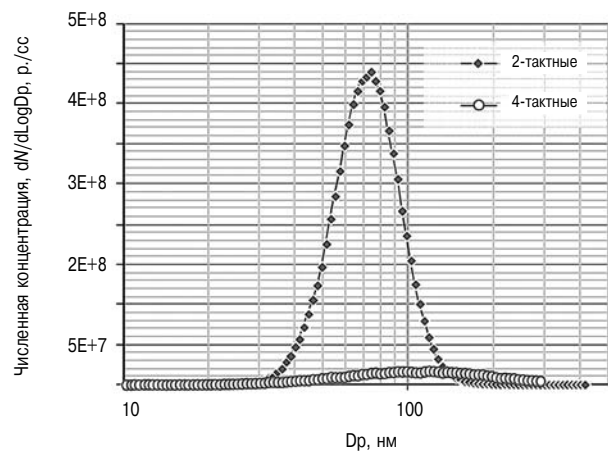


Рис. 17. Распределение частиц по размерам, измеренное с помощью SMPS:

нагрузка двигателя — 100 %; степень разбавления — 1000

газах двухтактного и четырехтактного дизелей, с использованием метода горячего разбавления. При этом дизель работал на малосернистом MDO, а его нагрузка составляла 100 %. Распределение частиц по размерам, измеренное с помощью SMPS, показано на рис. 17.

Кривая размерной концентрации РМ в ОГ двухтактного дизеля имеет пик, соответствующий диаметру частиц 75 нм, а для четырехтактного дизеля — диаметру частиц 150 нм. При этом численная концентрация РМ в широком диапазоне изменения диаметра частиц у двухтактного дизеля больше, чем у четырехтактного.

Средний размер диаметра частиц у двухтактного дизеля меньше, чем у четырехтактного. Поскольку, как упоминалось выше, отработавшие газы двухтактного дизеля содержат большое количество SOF, частицы конденсата измерялись как высоко концентрированные.

Заключение

Измерения размерного распределения частиц и массовой концентрации РМ проводились на дизелях двух типов. При этом получены следующие результаты:

1. Измерения, проводимые с помощью SMPS, показали, что модальный диаметр частиц РМ в отработавших газах судовых дизелей остается в пределах 100 нм при всех условиях эксперимента.

2. При сравнении размерных распределений частиц, полученных методами горячего разбавления и разбавления с охлаждением установлено, что конденсация летучего компонента вызывает образование нуклеационных частиц в разбавляющем туннеле.

3. При измерениях с использованием ELPI размерное распределение частиц РМ в отработавших газах двухтактного дизеля при расчете массовой концентрации является бимодальным.

4. Для частиц диаметром менее 100 нм численная концентрация РМ в отработавших газах двухтактного дизеля больше, чем четырехтактного.

Условные обозначения и сокращения

PM	Частицы (Particulate matter)
CO ₂	Двуокись углерода (Carbon dioxide)
CPC	Счетчик частиц конденсата (Condensation particle counter)
DMA	Дифференциальный анализатор подвижности (Differential mobility analyzer)
ELPI	Электрический импактор низкого давления (Electrical low pressure impactor)
ISF	Нерастворимая фракция (Insoluble fraction)
ISO	Международная организация по стандартизации (International organization for standardization)
MDO	Морское дизельное топливо (Marine diesel oil)
NO _x	Оксиды азота (Nitrogen oxide)
PTFE	Политетрафторэтилен (Polytetrafluoroethylene)
SMPS	Сканирующий измеритель подвижности частиц (Scanning mobility particle sizer)
SOF	Растворимая органическая фракция (Soluble organic fraction)
SO _x	Оксиды серы (Sulfur oxide)

Литература

1. ISO 8178-1, Reciprocating internal combustion engines — Exhaust emission measurement. Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions, 2006.
2. *Tsukamoto T., Ohe K., Okada H.* Measurement of Particulate Emission from Two-Stroke Marine Diesel Engine, Proceedings of ISME 2000, Vol.1, TS-52, 2000.
3. *Tsukamoto T., Miyoshi T., Ohe K., Okada H.* Characteristics of Particulate Emission from Marine Diesel engines -Comparison between High Speed Four-stroke Engine and Low Speed Two-stroke Engine // Journal of the Marine Engineering Society in Japan. 1998. № 33-4, P. 306–310.
4. *Kasper A., Aufdenblatten S., Forss A., Mohr M., Burtcher H.* Particulate Emissions from a Low-Speed Marine Diesel Engine, Aerosol Science and Technology. 2007. № 41:1. P. 24–32.
5. *Abdul-Khalek I., Kittelson D.* The Influence of Dilution Conditions on Diesel Exhaust Particle Size Distribution Measurements, Society of Automotive // Engineers Technical Paper. 1999 № 01-1142.
6. *Kittelson D.* Recent Measurements of Nanoparticle Emissions from Engines, Meeting of Current Research on Diesel Exhaust Particles Japan Association of Aerosol // Science and Technology. 2001.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ
И ХАРАКТЕРИСТИК САЖЕОБРАЗОВАНИЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДОБАВОК
В ДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО
МЕТИЛОВОГО ЭФИРА ЖИРНЫХ КИСЛОТ**

*Akihiko Azetsu, Mohammad Haris,
Tokai University
Anh Tuan Pham, Phung Kim Le,
Ho Chi Minh City University of Technology*

Введение

Биотопливо имеет растительное происхождение и, следовательно, является источником возобновляемой энергии. Его использование способно уменьшить зависимость энергетики от ископаемых топлив [1]. Считается также, что при сгорании биотоплива выделяется примерно столько углекислого газа, сколько поглощается в процессе фотосинтеза при выращивании растений. По мнению специалистов, эта концепция, обычно именуемая нулевым балансом углерода, может внести свой вклад в замедление глобального потепления. Привлекательность биотоплив заставила многих исследователей приступить к изучению экологических характеристик биодизеля и показателей двигателей при работе на этом топливе [2–5].

Для изучения параметров горения были взяты три вида биодизеля: метиловый эфир пальмового масла (PME — palm oil methyl ester), метиловый эфир кокосового масла (CME — coconut methyl ester) и метиловый эфир рапсового масла (RME — rapeseed methyl ester) [6, 7]. Каждый из них смешивался с дизелем в различных пропорциях, и эта смесь подавалась в испытательную камеру сгорания высокого давления. При этом концентрация кислорода менялась в пределах от 21 до 16 %. Как показали результаты испытаний, период задержки самовоспламенения и температура пламени для каждого вида топлива почти не зависят от его доли в смеси. В то же время различия в сажеобразовании значительны, причем меньше всего сажи образуется при использовании чистого CME. Поскольку биодизель состоит из нескольких видов метилового эфира жирных кислот (FAME), определить главный фактор, влияющий на характеристики сгорания топлива довольно трудно. Поэтому в настоящей работе были исследованы различные типы FAME, присутствующие в биодизеле, которые смешивались с дизелем в различных пропорциях, с тем, чтобы изучить влияние содержания кислорода в топливе и числа двойных связей на характеристики сгорания и показатели вредных выбросов. Для более детального изучения этих характеристик применялась визуализация горящего факела биодизеля в специальной камере сгорания постоянного объема

под высоким давлением. Температура пламени и концентрация сажи анализировались методом двухцветной пирометрии при регистрации светящегося пламени. Необходимые параметры в камере — высокое давление и высокая температура — поддерживались на постоянном уровне во всех экспериментах, с тем, чтобы по возможности уменьшить изменение окружающих условий и сложность изучаемого явления.

**Оборудование стенда
и методика экспериментов**

Схема экспериментальной установки (которая использовалась и в предыдущих исследованиях [6, 7]), показана на рис. 1. Установка состоит из камеры сгорания постоянного объема, системы впрыска топлива с электронным управлением и нескольких оптических систем. Внутренняя полость камеры имеет форму цилиндра диаметром 80 мм с двумя кварцевыми смотровыми окнами диаметром также 80 мм. Система впрыска топлива установлена на верхнем торце камеры и ориентирована так, чтобы впрыск топлива происходил сверху вниз.

В настоящем исследовании использована аккумуляторная система впрыска с электронным управлением [8]. Схема установки форсунки и конструкция распылителя показаны на рис. 2. Конструкция распылителя обычная, за исключением нажимного штифта, который удлинен для обеспечения контакта с пьезоэлектрическим приводом, непосредственно управляющим движением иглы. При этом величина топливоподачи регулируется изменением площади проходного сечения потока топлива.

Высокие значения давления и температуры в камере сгорания достигаются за счет сжигания водорода в атмосфере, состоящей из кислорода и азота. Состав рабочей смеси подбирается

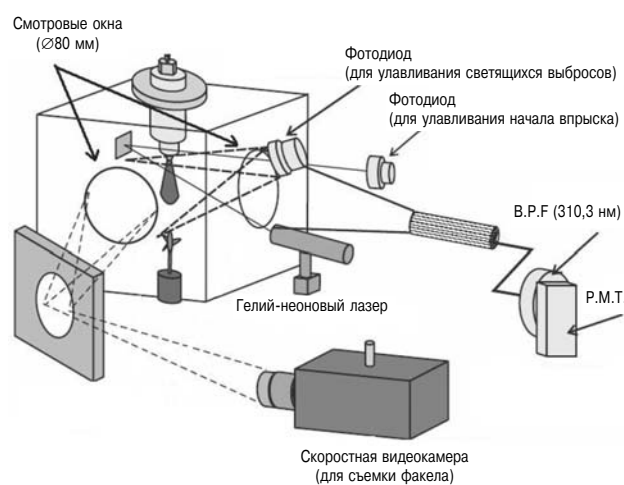


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Свойства топлив

	Дизельное топливо	Метил Лаурат	Метил Лолеат	Метил Линолеат	Метил Линоленат	Метилловый эфир семян каучука
Формула		$C_{13}H_{26}O_2$	$C_{19}H_{36}O_2$	$C_{19}H_{34}O_2$	$C_{19}H_{32}O_2$	
Соотношение C:N		13:0	19:1	19:2	19:3	
Цетановое число	55	61,4	56	41,7	45,9	50,4
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	44,5	35,25	37,26	37,08	37,08	37,63
Плотность, кг/м ³	824	865	877	888	895	888
С, вт-%	83,9	72,8	77	77,5	78	76,5
Н, вт-%	16,1	12,2	12,2	11,6	11	12
О, вт-%	0	14,9	10,8	10,9	10,9	11,5

таким образом, чтобы концентрация кислорода после выгорания водорода достигала заданного уровня. Когда водород выгорал, производился впрыск топлива в камеру сгорания в момент, когда давление в ней достигало расчетного значения, соответствующего условиям самовоспламенения.

Для фиксации момента начала впрыска использовался луч гелий-неонового лазера, проходящий прямо под распылителем. С одной стороны окна была установлена труба фотомножителя с оптическими полосовым фильтром, рассчитанного на длину волны 310,3 нм (FWHM: 16,3 нм). Он предназначен для измерения интенсивности светового излучения радикала OH, испускаемого при сгорании топлива, что позволяет оценить период задержки самовоспламенения.

Снимки факела, сделанные с помощью высокоскоростной видеокамеры, анализировались методом двухцветной пирометрии [9], что позволяет оценивать двумерное распределение температур и концентрации сажи в пламени.

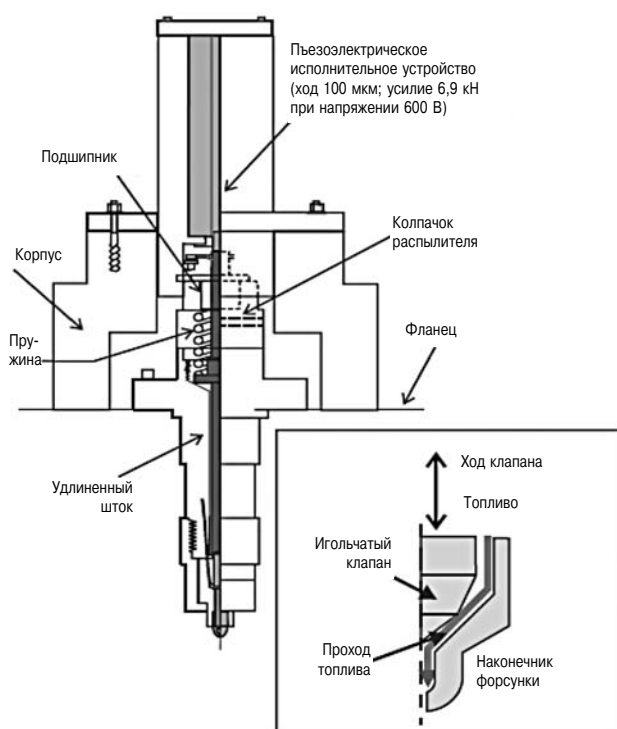


Рис. 2. Конструкция и схема установки форсунки

В основе данного метода лежит зависимость интенсивности излучения горячей сажи от ее температуры и концентрации по показателю KL-фактора [10]. KL-фактор характеризуется количеством сажи в факеле. Если предположить, что температура сажи равна температуре продуктов горения, то этот показатель может служить надежным показателем температуры пламени, и в дальнейшем будет именоваться просто «температурой пламени». Калибровка системы видеосъемки производилась с помощью калибровочной вольфрамовой лампы.

В настоящей работе исследовались следующие виды FAME: метиловый эфир лауриновой кислоты (ML), метиловый эфир олеиновой кислоты (MO), и метиловый эфир линоленовой кислоты (MLn), основные компоненты CME, PME и RME. Кроме того, наряду другими видами FAME исследовался еще один вид биодизеля, а именно, метиловый эфир семян каучукового дерева (RuME). Свойства этих топлив приведены в табл. 1. Сравнительные испытания были проведены для двух методов производства RuME из семян каучукового дерева. Первый метод — обычный двухступенчатый процесс, включающий обработку щелочным катализатором. RuME, произведенный этим способом, будем в дальнейшем именовать RuMEс. Другой метод — получение метанола в сверхкритических условиях без катализатора [11]. RuME, произведенный этим способом, будем в дальнейшем именовать RuMEс.

Перечисленные выше виды FAME и биодизеля смешивались с дизельным топливом в количествах 30, 60 и 100 % (т. е. чистый FAME). Данные смеси сильно отличались между собой такими параметрами, как цетановое число и содержание кислорода, что могло оказывать значительное влияние на характеристики сгорания.

Таблица 2

Условия эксперимента

Давление в КС, МПа	3,0
Температура в КС, К	985
Диаметр отверстий форсунок, мм	0,18
Давление впрыска, МПа	100
Количество топлива, мг	15,0
Топливо	Дизельное топливо
	Смешанное топливо ML
	Смешанное топливо MO
	Смешанное топливо MLi
	Смешанное топливо MLn
	Смешанное топливо RuMEs
	Смешанное топливо RuMEc
Степень замещения, %	30, 60, 100
Концентрация O ₂ , %	16, 21

В табл. 2 приведены условия впрыска и условия в камере сгорания. Давление впрыска во всех экспериментах составляло 100 МПа. Форма кривой впрыска в экспериментах была прямоугольной, как это свойственно системам common rail. Цикловой впрыск составлял 15 мг топлива. Тепловыделение при сгорании FAME было примерно на 15 % меньше, чем при сгорании дизеля, с учетом того, что во всех эксперимент массовый впрыск был одинаков для всех видов топлив.

Результаты исследования

Факторы, влияющие на процесс сгорания

На рис. 3 и 4 показано влияние некоторых факторов на задержку самовоспламенения смеси для разных видов топлива. Под задержкой самовоспламенения в данном случае понимается период, начиная с момента, когда струя топлива перекрывает луч лазера детектора, и кончая моментом, когда свечение радикала OH улавливается фотоумножителем. Излучение радикалов OH является достоверным индикатором реакции горения. На рис. 3 показано влияние относительного содержания каждого вида FAME и биодизеля в смесевом топливе на задержку самовоспламенения при начальной концентрации кислорода в камере сгорания 21 %. Цетановое число является индикатором задержки самовоспламенения для данного вида топлива. Из результатов, приведенных на рисунке видно, как изменение доли FAME в топливе реально на нее влияет. В то же время мы видим, что задержка самовоспламенения для разных видов FAME и биодизеля почти такая же, как и для дизельного топлива, даже при различном содержании в нем биодобавок. По-видимому, цетановое число мало влияет на задержку самовоспламенения

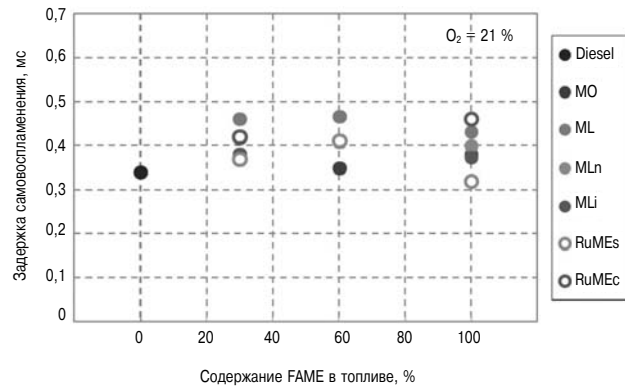


Рис. 3. Влияние содержания FAME в топливе на задержку самовоспламенения

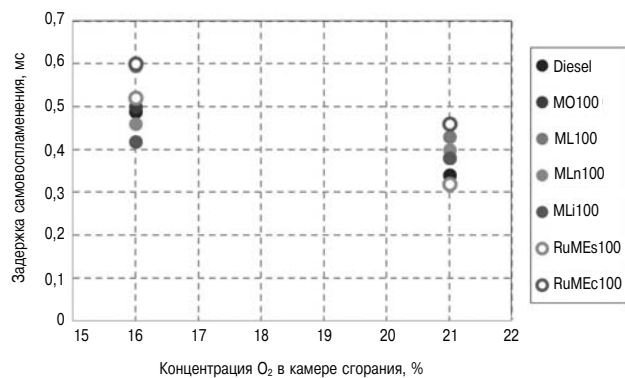


Рис. 4. Влияние концентрации O₂ на задержку самовоспламенения

при высокой температуре, которая во всех наших экспериментах поддерживалась на уровне 985 К. На рис. 4 показано влияние концентрации кислорода на задержку самовоспламенения для каждого вида топлива. Чем концентрация кислорода меньше, тем больше задержка самовоспламенения.

Факторы, влияющие на температуру пламени

Для понимания факторов, влияющих на температуру пламени, были сделаны фотоснимки, обработка которых методом двухцветной пирометрии позволила построить 2-D распределение температурных полей факела. На рис. 5 показаны снимки, сделанные через 2 мс после начала впрыска чистых FAME и биодизеля при значениях концентрации кислорода 16 и 21 %. Процесс развития факела в осевом направлении (не показан) происходит очень быстро, так что его фронт проходит поле зрения (через окно 80 мм) всего за 1,4 мс. Потому имеется возможность наблюдать только горение топлива, оставшегося в области наблюдения, что соответствует области квазистационарного диффузионного пламени в модели горение струи дизеля, предложенной автором Dec [12]. На рис. 5 показано, что тем-

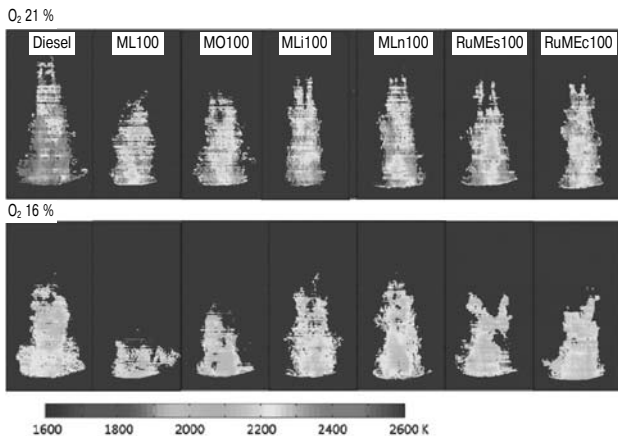


Рис. 5. 2-D распределение температуры пламени

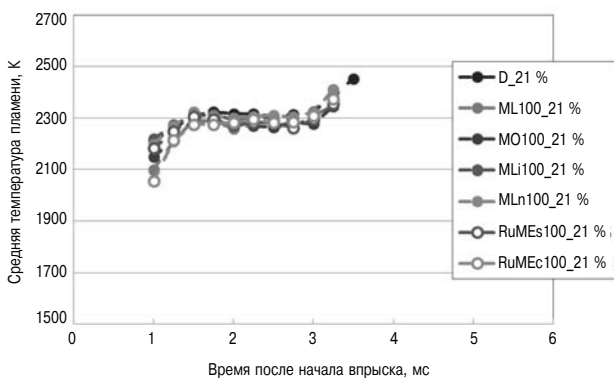


Рис. 6. Средняя температура пламени (O_2 21 %)

температура пламени снижается при снижении концентрации кислорода, что объясняется эффектом разбавления. Вид и скорость распространения факела существенно меняются в зависимости от вида топлива. Особенно заметна задержка свечения пламени у топлив с большим содержанием кислорода, таких как ML, а также у топлив с малым числом ненасыщенных связей, таких как MO. Однако из видимых двумерных изображений пламени уловить разницу температур факела для разных топлив довольно трудно.

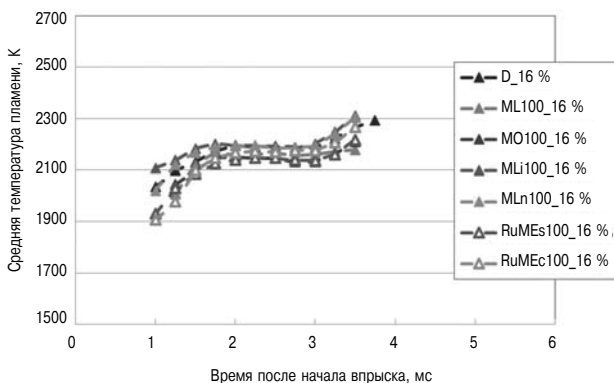


Рис. 7. Средняя температура пламени (O_2 16 %)

На рис. 6 и 7 показано влияние вида топлива на среднюю температуру пламени при концентрации кислорода 21 и 16 % соответственно. Средняя температура — это усредненная по площади наблюдения температура пламени. Как видно из рисунков, при постоянном содержании кислорода различие сортов топлива оказывает на среднюю температуру пламени лишь незначительное влияние. Столь же незначительное влияние на нее оказывает концентрация FAME в топливе.

Влияние различных факторов на сажеобразование

На рис. 8 показаны результаты экспериментов по определению 2-D распределений KL-фактора, измеряемых с помощью системы двухцветной пирометрии. Как и на рис. 5, данные для топлив, полностью состоящих из FAME разных видов и биодизеля, сравниваются с данными для чистого дизеля при концентрации кислорода 21 и 16 %. Значение KL-фактора представляет собой меру количества сажи, находящейся в пределах прямой видимости. Следовательно, высокие значения KL-фактора соответствуют областям с более высоким содержанием сажи. Все снимки сделаны через 2,0 мс с момента начала впрыска. Показано, что плотность облака сажи при горении FAME в смеси

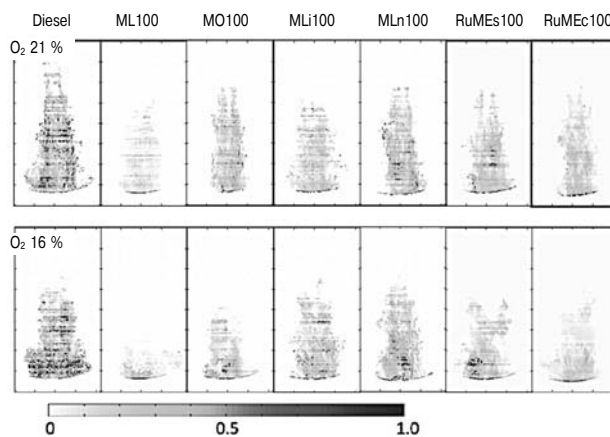


Рис. 8. 2-D распределение KL-фактора

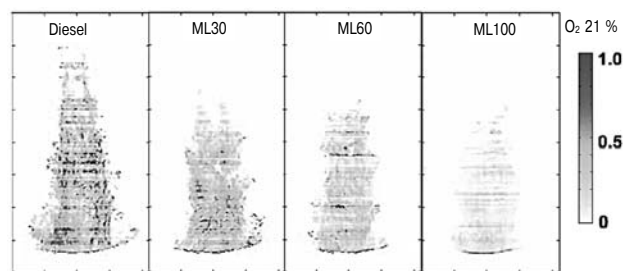


Рис. 9. 2-D распределение KL-фактора (влияние концентрации FAME в топливе)

с биодизелем меньше, чем при горении чистого дизельного топлива. Это особенно заметно при использовании топлива, на 100 % состоящего из ML, с максимальным содержанием кислорода и полным отсутствием ненасыщенных связей. Такая же тенденция прослеживается при концентрации кислорода 16 %. Однако при уменьшении концентрации кислорода смещение светящегося факела в сторону движения струи топлива объясняется, скорее всего, задержками смесеобразования и самовоспламенения. На рис. 9 представлено влияние концентрации FAME в топливе на двумерные распределения KL-фактора. Показано, что при увеличении концентрации ML, т. е. при повышении содержания кислорода в топливе, плотность сажи уменьшается, а светящийся факел смещается в сторону движения струи топлива. Другие виды FAME вызывают аналогичный эффект (цифры здесь не приводятся).

Чтобы можно было количественно и более точно оценить сажеобразование, на рис. 10 и 11 показано изменение во времени общего KL-фактора. Общий KL-фактор является мерой общего содержания сажи в пламени, получаемой интегрированием KL-фактора по всей площади пламени. Следует напомнить, что все измерения

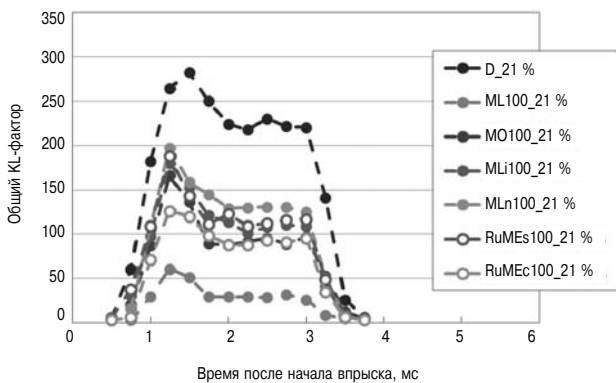


Рис. 10. Общий KL-фактор (O₂ 21 %)

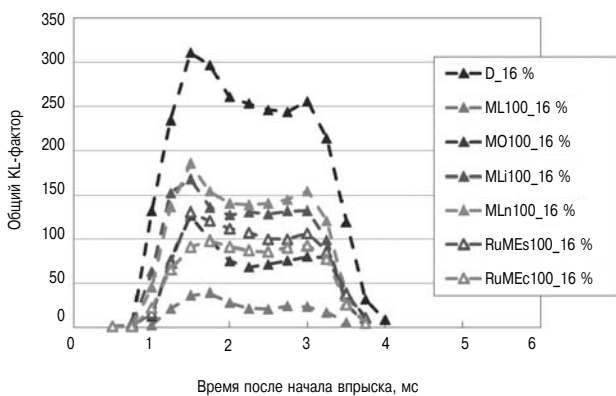


Рис. 11. Общий KL-фактор (O₂ 16 %)

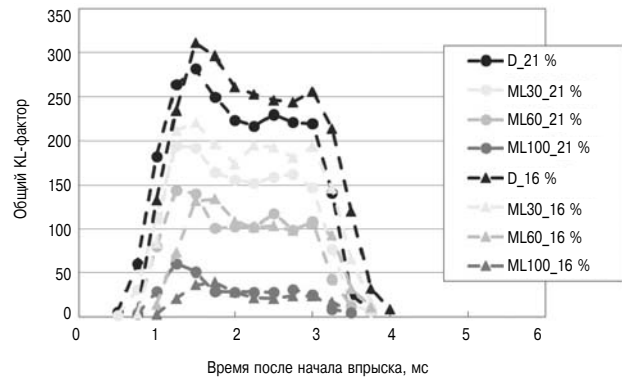


Рис. 12. Общий KL-фактор (влияние содержания ML в топливе)

относятся к площади окна наблюдения, снимок которого сделан через 1,4 мс после начала самовоспламенения. Данные для топлив, полностью состоящих из разных видов FAME и биодизеля, сравниваются с данными для чистого дизеля при концентрации кислорода 21 и 16 %.

На рис. 10 показано, что наименьшее сажеобразование дает ML. Это объясняется, прежде всего, тем, что ML содержит больше всего кислорода. Хотя в MO, MLi и MLn кислорода содержится почти столько же, сколько в ML, все они несколько отличаются друг от друга уровнем сажеобразования и величиной KL-фактора, располагаясь в таком порядке: MLn > MLi > MO. Это объясняется влиянием числа двойных связей в каждом из FAME. Что же касается различных видов биодизеля, то значения общего KL-фактора в RuMEs и RuMEc те же, что и в MO и MLi. Причиной может быть примерно одинаковое содержание кислорода в различных биотопливах, с одной стороны, и в MO и MLi, с другой стороны. Может также оказать влияние технология производства биодизеля. Метод получения сверхкритического метанола RuMEs, дает чуть более высокие значения, чем обычный метод получения RuMEc.

При концентрации кислорода 16 % значения общего KL-фактора для всех видов топлив чуть выше, чем при концентрации кислорода 21 %, однако количественные характеристики во всех случаях более или менее одинаковы. Как видно из рис. 10 и 11, значения общего KL-фактора остаются постоянными в диапазоне от 2 до 3 мс, что указывает на квазистационарное состояние пламени горящего дизельного топлива.

На рис. 12 показано влияние содержания ML в топливе и концентрации кислорода в камере сгорания на изменения общего KL-фактора во времени. Очевидно, что при увеличении содержания ML в топливе уровень общего KL-фактора монотонно уменьшается. Это свидетельствует о том, что присутствие FAME за-

медляет сажеобразование. При уменьшении концентрации кислорода значение общего KL-фактора несколько увеличивается при всех значениях содержания ML в топливе. Однако добавка ML в дизельное топливо способствует подавлению сажеобразования. Это означает, что совместное использование добавки биодизеля и EGR для одновременного снижения уровня NOx и дымления бесполезно.

Механизмы сажеобразования

В предыдущем разделе мы упоминали о том, что содержание кислорода в топливе оказывает значительное влияние на величину общего KL-фактора, т. е. на количество сажи в пламени. Чтобы можно было оценить этот эффект количественно, на рис. 13 и 14 показано влияние содержания кислорода в топливе на общий KL-

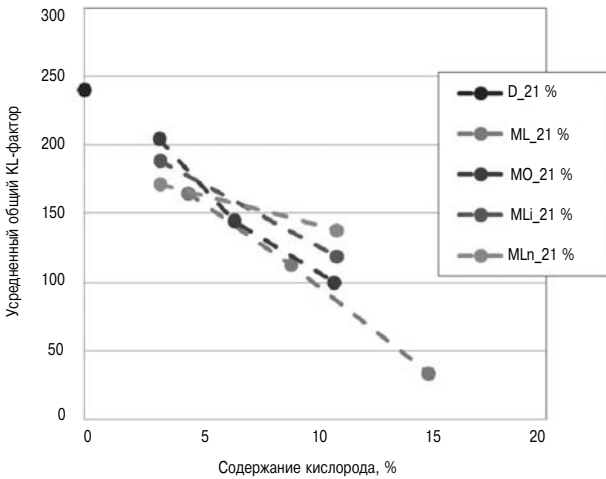


Рис. 13. Зависимость общего KL-фактора от содержания кислорода в топливе (O₂ 21 %)

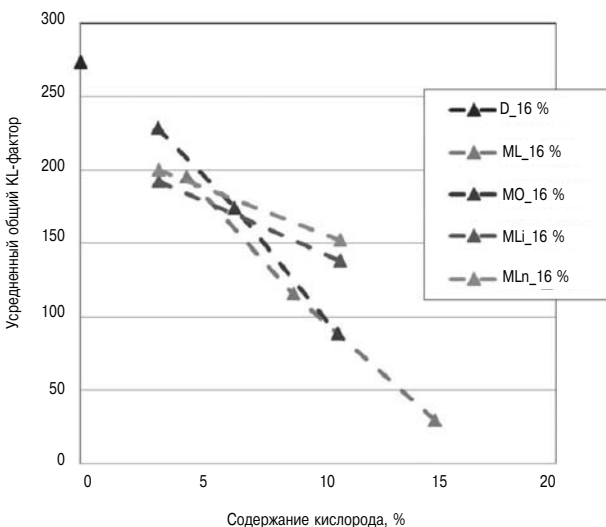


Рис. 14. Зависимость общего KL-фактора от содержания кислорода в топливе (O₂ 16 %)

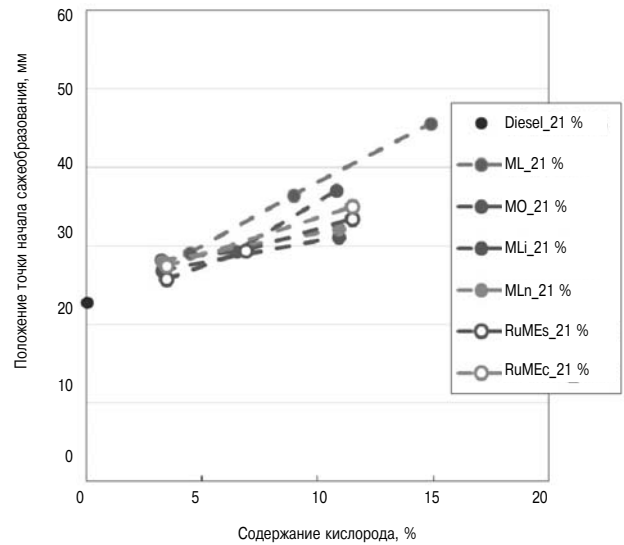


Рис. 15. Зависимость точки начала сажеобразования от содержания кислорода в топливе (O₂ 21 %)

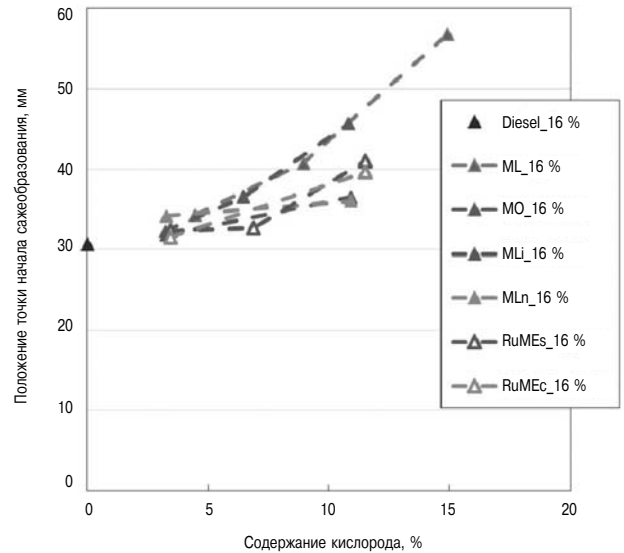


Рис. 16. Зависимость точки начала сажеобразования от содержания кислорода в топливе (O₂ 16 %)

фактор при двух значениях концентрации кислорода в камере: соответственно 21 и 16%. На графиках показана зависимость между средними значениями общего KL-фактора на временном интервале от 2 до 2,75 мс и концентрацией кислорода, рассчитанной по содержанию ML в топливе. Показано, что среднее значение общего KL-фактора линейно уменьшается по мере увеличения массовой доли кислорода в топливе. Однако в случае использования MLi и MLn, имеющих большее число двойных связей, величина общего KL-фактора несколько выше, причем линии зависимости общего KL-фактора от содержания кислорода имеют различный градиент.

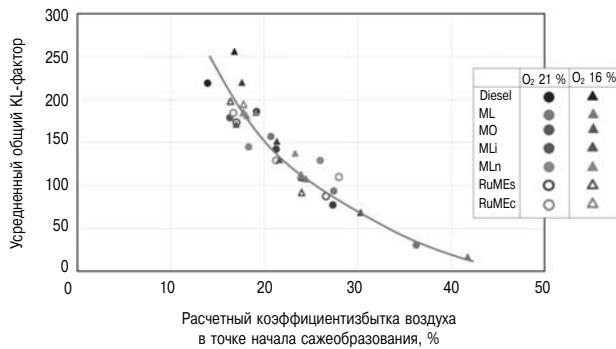


Рис. 17. Зависимость общего KL-фактора от расчетного коэффициента избытка воздуха в начале процесса сажеобразования

Другой существенной особенностью поведения пламени при горении FAME или биодизеля, по сравнению с дизельным топливом, является более позднее появление светящего факела. Точка начала свечения факела, т. е. начала сажеобразования, при горении FAME и различных видов биодизеля движется по направлению движения топлива. Причины этого явления поясняются данными на рис. 15 и 16, где показано влияние содержания кислорода и вида топлива на расстояние между выходом из сопла и стартовой позицией светящего факела. Как видно, при увеличении содержания кислорода это расстояние растет. Однако в случае MLi, MLn и биодизеля оно несколько меньше, что свидетельствует о более интенсивном сажеобразовании.

Ранее было отмечено, что коэффициент избытка воздуха на участке начала движения, т.е. между выходом топлива из сопла и стартовой позицией начала горения, оказывает сильное влияние на сажеобразование при сгорании дизельного топлива [13]. На рис. 17 показано влияние коэффициента избытка воздуха в точке начала сажеобразования на среднюю величину общего KL-фактора. Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по уравнению, выведенному в работе [13]. Как видно из графика, это соотношение для всех переменных, включая тип топлива, содержание ML в топливе и концентрации кислорода в камере могут быть описаны одной и той же функцией. Количество сажи уменьшается при увеличении расчетного коэффициента избытка воздуха в точке начала сажеобразования. Этот результат подтверждает большое значение количества кислорода в начале воспламенения [13], а также то, что вид топлива, содержание кислорода и число двойных связей могут влиять на рабочий процесс и сажеобразование на самой ранней его стадии.

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование влияния добавления FAME в дизельное топливо

на самовоспламенение, температуру пламени и сажеобразование в факеле дизельного топлива. Эксперименты выполнены с использованием камеры сгорания, в котором поддерживались: давление 3 МПа и температура 985 К.

Давление впрыска во всех экспериментах поддерживалось на уровне 100 МПа. При этом были получены следующие результаты:

1. При достаточно высокой температуре заряда среды (порядка 1000 К) влияние на задержку самовоспламенения таких параметров, как вид топлива и содержание ML в топливе незначительно.
2. Вид топлива и содержание ML в топливе мало влияют на температуру пламени. Основной фактор, влияющий на температуру пламени — концентрация кислорода в окружающей среде.
3. FAME и различные виды биодизеля при сгорании дают меньше сажи, чем дизельное топливо. Сажеобразование уменьшается при снижении содержания кислорода в топливе и при уменьшении числа двойных связей в молекуле топлива.
4. Биодизель из каучукового масла может производиться двумя методами: обычным методом и методом сверхкритического метанола. Было показано, что технология производства биодизеля не оказывает влияния на характеристики сгорания и сажеобразования.
5. Коэффициент избытка воздуха в точке начала сажеобразования является доминирующим фактором, определяющим общий KL-фактор, т. е. количество сажи в пламени. Это количество уменьшается с ростом рассчитанного коэффициента избытка воздуха в точке начала сажеобразования.

Литература

1. Yamada J. and Tanaka Y. Manufacturing Process of Bio-diesel Fuel // Engine Technology. 2003. № 05-05. P. 45–51.
2. Agarwal A.K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines // Progress in Energy and Combustion Science. 2007. № 33(3). P. 223–271.
3. Kawasaki K. and Yamane K. «Combustion Improvement of Biodiesel-Fueled Engines for NO_x-PM Reduction». COMODIA 2008. 2008. P. 793–798.
4. Rao P.V., Rao B.V.A. and Rao N.S. «Biodiesel Characterization and Influence of its Properties on Combustion and Emission Characteristics of a DI Diesel Engine», COMODIA 2008, 2008. P. 807–814.
5. Okui N., Suzuki T. and Senda J. Research on DI Diesel Engine Use of Biodiesel Fuel -2nd Report: Basic Analysis of spray and Combustion Characteristics // Marine engineering. 2005. № 40-6. P. 63–69.
6. Azetsu A., Hagio H. and Aoki M. «A Study on the Spray Combustion Characteristics of Bio Diesel Fuel». 26th CIMAC World Congress. 2010. Paper № 164.

7. *Azetsu A. and Hagio H.* «Study on Spray Combustion Characteristics of Fatty Acid Methyl Ester Mixed with Diesel Oil». SAE Technical Paper. 2014. 2014-32=0083. doi:10.4271/2014-32-0083.

8. *Wakisaka Y. and Azetsu A.* «Effect of Fuel Injection Rate Shaping on Combustion and Emission Formation in Intermittent Spray». SAE Technical Paper. 2002. 2002-01-1159.

9. *Matsui Y., Kamimoto T. and Matsuoka S.* "A Study on the Time and Space Resolved Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a D.I. Diesel Engine by the Two-Color Method", SAE Paper 790491, 1979.

10. *Hottel H.C. and Broughton F.P.* «Determination of True Temperature and Total Radiation From Luminous Gas Flames», Ind. Eng. Chem., 4(2). P.166–175.

11. *Huy H.T., Viet T.T. and Phung L.T.K.* «Biodiesel Production from Rubber Seed Oil using SCM». 3rd World Conference on Applied Sciences, Engineering & Technology, 2014.

12. *Dec J.E.* «A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging». SAE Paper 970873, 1997.

13. *Siebers D.L., Higgins B.S. and Pickett L.M.* «Flame Lift-Off on Direct-Injection Diesel Fuel Jets: Oxygen Concentration Effects». SAE Paper 2002-01-0890, 2002.

НОВОСТИ ЧТЗ

НА ФОРУМЕ «АРМИЯ-2021» ЧТЗ ПРЕДСТАВИЛ ОБРАЗЦЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

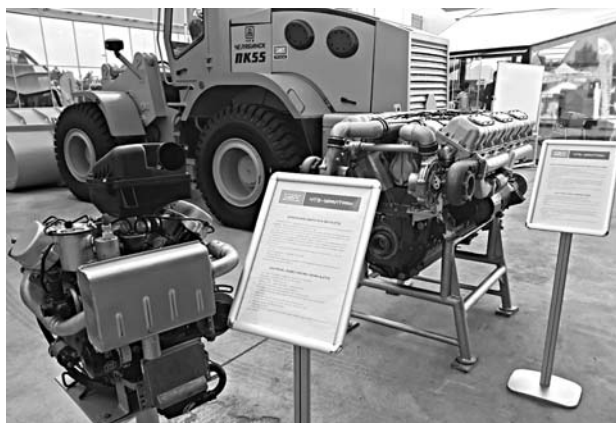
ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» (в составе АО «Концерн «Уралвагонзавод» входит в Госкорпорацию Ростех) впервые представил разрабатываемые в рамках диверсификации производства новые виды гражданских дизельных двигателей на Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2021». За счет их серийного выпуска планируется увеличить объем производства двигателей и выручку предприятия.

На сегодняшний день ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» — основной завод-изготовитель дизельных двигателей для бронетанковой техники Минобороны РФ. В рамках выполнения поручений президента России по увеличению доли гражданской продукции до 50 % ЧТЗ проводится диверсификация производства, создается линейка дизельных двигателей гражданского назначения. Так, на форуме «АРМИЯ» завод представил перспективные образцы двигателя В-31МФ (мощностью до 710 л. с.) и В248,2/7,8 (мощностью до 24,5 л. с.). Их можно будет применять на сельскохозяйственной, строительной технике, дизель-генераторных установках и др.

Двигатель В-31МФ проверен в эксплуатации в двухзвенных гусеничных вездеходах, в том числе в арктических условиях Сибири Арктики, неприхотлив к топливу. Ведется его дальнейшая модернизация для удовлетворения других возможных потребителей в соответствии экологическим нормам, а также требованиям по большему эксплуатационному ресурсу.

Производство двигателя В248,2/7,8 планируется в рамках программы импортозамещения. На сегодняшний день в России активно развивается малое машиностроение и для данной техники необходим российский двигатель соответствующей мощности.

«Та техника, которая сегодня оснащается двигателями зарубежных производителей, может работать на отечественном двигателе. Он будет



производиться полностью из российских комплектующих и применяться на малогабаритных тракторах, дизель-генераторных установках, сварочных агрегатах. За счет организации серийного выпуска гражданских дизелей нами планируется увеличить объем производства и выручки предприятия» — отмечает директор по маркетингу Андрей Печеркин.

Челябинск, 25 августа 2021

УДК 621.431

Дударева Н.Ю., Прокофьева М.А. Исследование влияния керамического покрытия на тепловое состояние гильзы цилиндра // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 3–6.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, гильза, микродуговое окислительное, керамическое покрытие, тепловой расчет, коэффициент теплопроводности.

Представлены методика и результаты исследования теплового состояния гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания с керамическим покрытием на рабочей поверхности. Рассмотрено влияние толщины и коэффициента теплопроводности керамического покрытия, сформированного методом микродугового окислительного, на тепловое состояние детали. Описана методика, разработанная для проведения термического расчета гильзы с использованием возможностей программы *SolidWorks Simulation*. Получена математическая зависимость величины снижения температуры поверхности гильзы от толщины покрытия и его коэффициента теплопроводности. Табл. 1. Ил. 4. Библ. 16 назв.

УДК 621.438

Коленько Г.С., Забелин Н.А., Фокин Г.А. Нестационарное аэродинамическое взаимодействие лопаточных венцов в энергетических осевых турбинах и пути повышения вибрационной надежности рабочих лопаток // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 7–11.

Ключевые слова: осевая турбинная ступень, вычислительная гидроаэродинамика, пакет Ansys CFX, переменные аэродинамические силы, нестационарный поток, аэродинамическое взаимодействие лопаточных венцов, межвенцовый осевой зазор, отношение шагов лопаток.

Цель работы — на основе численного исследования аэродинамических характеристик турбинных ступеней выработать рекомендуемые диапазоны безразмерных геометрических параметров — с точки зрения снижения возбуждающих вибрации лопаток нестационарных нагрузок и минимизации потерь кинетической энергии (т. е. максимизации уровня внутреннего КПД турбины). В данной работе исследовалось влияние межвенцового зазора и отношения шагов лопаток в турбинной ступени ЛПИ-1. Табл. 1. Ил. 7. Библ. 12 назв.

УДК 623.8

Кулагин А.В. Оценка работоспособности судовых дизелей методами диагностирования // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 12–15.

Ключевые слова: судовые дизели, оценка работоспособности, остаточный ресурс, методы диагностирования, инструментальный контроль, математический аппарат.

Рассмотрены вопросы оценки работоспособности судовых дизелей по показателю остаточного ресурса при использовании различных методов диагностирования. Выполнен анализ преимуществ и недостатков методов диагностирования с применением инструментального контроля состояния рабочих параметров и использованием анализа результатов регистрации внутрицилиндровых процессов. Приведены методы оценки состояния дизеля с целью определения мероприятий для восстановления остаточного ресурса, регламентированные для применения в атомной энергетике. Ил. 4. Библ. 9 назв.

УДК 621.436

Марков В.А., Бовэнь Са, Неверов В.А., Камалтдинов В.Г. Исследование воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизельного двигателя // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 16–21.

Ключевые слова: дизельный двигатель, нефтяное дизельное топливо, растительное масло, самовоспламенение, цетановое число.

Разработана методика сравнительного анализа критериев воспламеняемости растительных масел в камере сгорания дизеля, включающая определение факторов, оказывающих влияние на цетановое число растительных масел, и определение наиболее значимых из этих факторов. Показано, что цетановое число растительных масел зависит от температуры их воспламенения в закрытом тигле, от содержания в маслах олеиновой кислоты и предельных жирных кислот. Проведен корреляционный анализ этих зависимостей. Установлено, что наибольшей плотностью корреляции обладает зависимость цетанового числа растительных масел от температуры их воспламенения в закрытом тигле. Табл. 4. Ил. 2. Библ. 24 назв.

УДК 621.43.057

Плотников С.А., Пляго А.В., Кантор П.Я., Впорица М.Н. Координирование процессов стабилизации и сгорания этанолсодержащих топлив // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 22–27.

Ключевые слова: дизельное топливо, этанолсодержащая эмульсия, диоксид молибдена, повышение стабильности, цетановое число, задержка воспламенения, температура горения.

Объект исследования — высококонцентрированная ЭТЭ с присадкой комплексного действия. Задача исследования — изучение действия дисульфида молибдена в качестве координирующей присадки к топливу. Цель — теоретическое обоснование процесса выбора, разъяснение механизма и эффективности действия координирующей присадки на основе дисульфида молибдена на процессы стабилизации и кинетику процесса горения высококонцентрированных ЭТЭ. Методы исследования — теоретический анализ и экспериментальная проверка. Табл. 1. Ил. 5. Библ. 14 назв.

УДК 621.355.5

Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А. Особенности прогрева двигателя внутреннего сгорания после холодного пуска // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 28–34.

Ключевые слова: дизельный двигатель, холодный пуск, прогрев, износ, гильза, поршень, смазка, неполнота сгорания, активация топлива, температура ОС.

Цель исследования — оптимизация параметров прогрева дизельного двигателя после холодного пуска. Показано, что в период прогрева продолжительностью 6 минут доля негоревшего топлива снижается с 60–70 до 10 %. Далее, процессы, характеризующие энергопотоки в период послепускового прогрева, постепенно стабилизируются. Экспериментальные исследования показали, что относительно эффективной и экономически выгодной является активация топлива в топливопроводах перед форсунками, а наиболее оптимальный вариант — непосредственно в форсунках. Ил. 2. Библ. 12 назв.

УДК 621.43

Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О. Учитель, ученый, государственный деятель, гражданин (к 100-летию со дня рождения Михаила Георгиевича Круглова) // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 35–38.

Ключевые слова: д.т.н., проф. М.Г. Круглов, 100-летие со дня рождения, МГТУ им. Н.Э. Баумана, научные работы, педагогическая деятельность, звания и награды, ГКНТ СССР, государственная служба.

В сентябре 2021 г. Научно-техническая общественность и профессиональное сообщество отрасли двигателестроения России отметили 100-летие со дня рождения профессора Михаила Георгиевича Круглова — крупнейшего ученого и государственного деятеля Советской и Российской школы двигателестроения. Научные труды проф. Круглова М.Г. в области развития теории рабочих процессов поршневых ДВС благодаря их научному уровню и масштабности, до сих пор остаются актуальными и являются основополагающими в программах подготовки высококвалифицированных научных и конструкторских кадров отрасли двигателестроения. Библ. 3 назв.

УДК 621.43

Сажеобразование в поршневых ДВС (по материалам конгресса СИМАС) // Двигателестроение. — 2021. — № 3. — С. 39–54.

Ключевые слова: судовые дизели, выбросы частиц, черный углерод, методы измерения РМ по размерам, биотоплива различного состава, содержание кислорода, снижение выбросов частиц.

Показано, что снижение содержания серы в судовом топливе способствует снижению РМ и черного углерода, рассмотрены методы измерения частиц и факторов, влияющих на результаты их измерения. Выполнено измерение распределения частиц по размерам и их массовой концентрации в ОГ для двух типов судовых дизелей, а именно, высокооборотного двигателя малооборотного при работе на топливе MDO с низким и высоким содержанием серы. Выполнено исследование влияния степени разбавления и температуры разбавляющего воздуха на распределение частиц по размерам и их массовую концентрацию.

Выполнены многочисленные систематические исследования, связанные с изучением экономических и экологических характеристик двигателей, работающих на биодизеле, а также особенности сгорания таких биотоплив, как метиловый эфир пальмового масла (PME), метиловый эфир кокосового масла (CME) и метиловый эфир рапсового масла (RME). Однако, поскольку биодизель состоит из нескольких видов метилового эфира жирных кислот (FAME), определить основные факторы, влияющие на характеристики сгорания биодизеля довольно трудно. Показано что, при температуре в камере порядка 1000 К вид топлива и содержание FAME в смеси на задержку самовоспламенения почти не влияют. Хотя температура пламени заметно падает при снижении содержания кислорода в камере, ее изменения в зависимости от вида топлива и содержания FAME очень малы. По сравнению с дизелем при сгорании FAME образуется меньше сажи. Главной причиной этого является большее содержание кислорода в их составе.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником. Табл. 5. Ил. 34. Библ. 19 назв.

UDC 621.431

Dudareva N.Yu. and Prokofieva M.A. Influence of ceramic plating on cylinder liner thermal condition // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 3–6.

Keywords: reciprocating engine, cylinder liner microarc oxidation, ceramic plating, thermal analysis, thermal conductivity coefficient.

The article discusses the method and results of research into thermal condition of a plated cylinder liner. Presented are method and results of investigation into the influence of thickness and thermal conductivity of ceramic plating, applied with microarc oxidation method, onto the thermal condition of the liner. The method of plated cylinder liner thermal analysis, making use of SolidWorks Simulation software package, is described. Temperature of cylinder liner surface under the plating was measured in three zones: the upper zone, the middle zone (contacting with the piston), and the lower zone. Each zone is characterized by zone-specific boundary conditions, as close as possible to real liner operating conditions. Furthermore, thermal condition of unplated cylinder liner has been analyzed. Also, dependence of cylinder liner temperature on plating thickness and thermal conductivity. 1 table, 4 ill., 16 ref.

UDC 621.438

Kolenko G.S., Zabelin N.A. and Fokin G.A. Nonstationary aerodynamic interaction of blade rows in high-powered axial turbines, and improvement of blade vibrational reliability // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 7–11.

Keywords: axial turbine stage, computation hydraulic gas dynamics, Ansys CFX software package, nonstationary flow, aerodynamic interaction of blade rows, inter-row axial clearance, blade spacing ratio.

Periodical nonstationarity of flow in modern gas turbines leads to variability of aerodynamic forces exerted to the blades, which results in higher losses of flow kinetic energy. This work aims at elaboration of recommended ranges of nondimensional geometric parameters (based on numerical analysis of turbine stages' aerodynamic characteristics), with a view to reduce nonstationary loads of the blades, so as to mitigate blade vibrations and minimize losses of kinetic energy, thus maximizing internal turbine efficiency. This work also examines the influence of inter-row axial clearance and blade spacing ratio, as applied to turbine stage LPI-1. 1 table, 7 ill., 12 ref.

UDC 623.8

Kulagin A.V. Diagnostics as a means of marine engine operability evaluation // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 12–15.

Keywords: marine diesel engines, evaluation of engine operability, residual life, diagnostic methods, instrument inspection, mathematical apparatus.

The article discusses evaluation of marine engine operability based on its residual life, using various diagnostic methods. Demonstrated are advantages and drawbacks of each diagnostic method, using instrument inspection and results of combustion parameters registration. Diagnostic methods are evaluated from the viewpoint of their suitability for finding methods of engine residual life restoration, acceptable for implementation in nuclear power industry. As it was shown, there are no universal diagnostic method, which would guarantee exact estimation of marine engine operability and residual life. 4 ill., 9 ref.

UDC 621.436

Markov V.A., Bowen Sa, Neverov V.A. and Kamaltdinov V.G. Combustibility of vegetable oils in diesel engine combustion chamber // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 16–21.

Keywords: diesel engine, oil-based diesel fuel, vegetable oil, self-ignition, cetane number. The authors offered a method of comparative analysis of vegetable oil combustibility in diesel engine combustion chamber.

This method includes determination of factors affecting vegetable oil cetane number, and identifies the most important of said factors. Vegetable oil cetane number is shown as depending on its ignition point in closed crucible, oleic acid and saturated fatty acid percentage. Correlation analysis of the above dependencies has been carried out. The dependency of vegetable oil cetane number on its ignition point in closed crucible is shown as providing maximum correlation density. 4 tables, 2 ill., 24 ref.

UDC 621.43.057

Plotnikov S.A., Plyago A.V., Kantor P.Ya. and Vtyurina M.N. Coordination of stabilization and combustion of ethanol-containing fuels // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 22–27.

Keywords: diesel fuel, ethanol-containing emulsion, molybdenum dioxide, stabilization, cetane number, ignition lag, combustion temperature.

The authors investigated performance of ethanol-containing emulsion, containing a complex-action additive. The aim of the work is examination of molybdenum disulphide performance as a corrective additive to fuel. The authors provide theoretical justification of additive selection, description of molybdenum disulphide-based additive action mechanism on stabilization and kinetics of high-concentration combustion. The investigation includes theoretical analysis and experimental validation of results. 1 table, 5 ill., 14 ref.

UDC 621.355.5

Krohla G.M., Homchenko Ye.N. and Usatyh N.A. Behavior of a reciprocating engine during warm-up after its cold start // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 28–34.

Keywords: diesel engine, cold start, warm-up, wear, cylinder liner, piston, lubrication, combustion incompleteness, fuel activation, combustible mixture temperature.

The investigation is targeted at optimization of warm-up characteristics after the cold start. It is shown that during 6 minutes-long warm-up period unburned fuel percentage drops down from 60–70 to 10 %. Then, energy flow characteristics are gradually stabilizing during the post-start period. According to the results of our experiments, energy losses may be considerably reduced by means of fuel activation upstream of the injectors, still better — within the injectors. 2 ill., 12 ref.

UDC 621.43

Kavtaradze R.Z. and Onischenko D.O. Master, scientist, statesman, citizen (anent 100th anniversary of Michail G. Kruglov) // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 35–38.

Keywords: professor M.G. Kruglov, 100th anniversary, Bauman University, studies, educational work, titles and rewards, government service.

In September 2021 engine builders celebrated 100th anniversary of professor M.G. Kruglov, outstanding Russian scientist and statesman. Prof. M.G. Kruglov's learned works in the domain of combustion processes still remain actual and fundamental in training programs for highly skilled engine building specialists. 3 ref.

UDC 621.43

Carbon-black formation in reciprocating engines (based on CIMAC Proceedings) // *Dvigatlestroyeniye*. — 2021. — № 3. — Pp. 39–54.

Keywords: marine engines, particulate matter emissions, particle size distribution measurement methods, various biofuels, oxygen concentration, reduction of particulate matter emissions.

It is shown that lowering sulfur concentration in marine fuel results in lower emissions of PM and black carbon. Presented are methods of PM measurement and factors that may influence the measurement results. The engines were fired with low-sulfur and high-sulfur MDO fuel. Furthermore, particle size distribution was measured by a hot-dilution method and a cooled dilution method. In the hot-dilution method, exhaust gas from the engine is diluted with high temperature air. The effects of the dilution ratio and the dilution air temperature in the dilution tunnel on particle size distribution and mass concentration of particulate matter were examined.

The global warming problem caused by a large amount of discharged carbon dioxide from the use of fossil fuel required urgent measure to overcome this matter. In addition, the depletion of fossil fuel is thought as a huge problem for near future. Thus these problems have attracted many attentions of using biofuels especially that derived from vegetable oils as an alternative fuel for internal combustion engine. The authors conducted the systematic fundamental studies examining the spray combustion characteristics of biodiesels such as palm oil methyl ester (PME), coconut methyl ester (CME) and rapeseed methyl ester (RME). However, as biodiesel consists of some kinds of fatty acid methyl ester (FAME), thus it is difficult to determine the major factor governing the combustion characteristics of biodiesels. Therefore, in the research in question different types of FAME which present in biodiesel were used. Following hydrogen combustion, fuel was injected into the vessel at the time when the ambient pressure reached the expected value, and the spray combustion was then examined. Though the soot yield increases as the ambient oxygen concentration decreases, FAMES suppressed the amount of soot emission even at low ambient oxygen concentration due to its high oxygen content. Under the high temperature ambient condition around 1000 K, type of fuel and the mixing rates has small effect on the ignition delay.

The original paper is translated into Russian by G.Melnik, PhD. 5 tables, 34 ill., 19 ref.

Уважаемые читатели журнала!

На журнал «Двигателестроение»
можно подписаться
в почтовых отделениях связи
по каталогу агентства
«ПРЕССА РОССИИ».
Подписной индекс журнала
«Двигателестроение» —
70259

Подписаться на журнал можно в редакции.
Срок подписки на журнал «Двигателестроение»
в редакции не ограничен.
Для оформления подписки в редакции
нужно отправить заявку
по e-mail: ecology@rdiesel.ru.
Почтовый адрес редакции:
190020, Санкт-Петербург, а/я 9.
Телефон редакции: +7 (812) 719-73-30
В редакции можно приобрести ранее вышедшие номера журнала
(см. www.rdiesel.ru)



190020,
Санкт-Петербург, а/я 9
Тел: +7(812)719-73-30
e-mail: ecology@rdiesel.ru
www.rdiesel.ru