

## Выводы

1. Установлено, что при работе на подогретом рапсовом масле удельный индикаторный расход топлива выше, а среднее индикаторное давление ниже, чем у дизельного топлива. Это связано со снижением теплотворности масла и скорости тепловыделения. Минимальный удельный расход топлива обеспечивается при подогреве масла до 60–80 °С.

2. Дымность ОГ при работе двигателя на рапсовом масле по всей внешней скоростной характеристике снизилась практически в два раза, количество выбросов окислов азота увеличилось на 20,5 %.

3. Рекомендуется применение в дизелях рапсового масла подогретого до температуры  $75 \pm 5$  °С.

## Литература

1. Девянин, С.Н. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей / С.Н. Девянин, В.А. Марков, В.Г. Семенов. – М.: Изд. центр ФГОУ ВПО МГАУ. – 2008. – 340 с.

2. Кухаренок, Г.М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей / Г.М. Кухаренок, А.Н. Петрученко, В.И. Березун. – Минск, 2014. – 248 с.

3. Применение топлива на основе рапсового масла в дизелях / Д.Д. Матиевский [и др.] // Ползуновский вестник. – 2006. – № 4. – С. 118–127.

УДК 621.436

## ОБРАЗОВАНИЕ САЖИ В ЦИЛИНДРЕ ДИЗЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА СПИРТОСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВАХ SOOT FORMATION IN DIESEL CYLINDER AT WORK ON FUEL CONTAINING ALCOHOL

*Петрученко А.Н.*, кандидат технических наук, доцент  
(Белорусский национальный технический университет)

*Petruchenko A.N.*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
(Belarusian National Technical University)

**Аннотация.** *Приведена зависимость, уточняющая феноменологическую модель образования сажи. Представлены результаты исследований и выполнен анализ влияния спиртов на образование сажи.*

**Abstract.** *Dependence to clarify the phenomenological model of soot formation. The results of the research and the analysis of the impact of alcohol on the formation of soot.*

Математические модели образования сажи можно разделить на модели с детальным механизмом проходящих при сгорании топливозоудной смеси химических реакций и модели с упрощенным механизмом [1]. Детальные многошаговые химические модели формирования и окисления сажи используются в канонических системах ламинарного и турбулентного горения, требуют больших вычислительных затрат. По утверждению некоторых исследователей, разница в расчетных прогнозах обоих видов моделей по сравнению с экспериментальными данными невелика и направлена в сторону увеличения образования сажи.

По типу модели образования сажи делятся на три категории: эмпирические, феноменологические, статистические. Статические модели при незначительных вычислительных затратах для получения усредненного результата требуют существенных по количеству экспериментальных измерений, кроме того область их применения ограничивается типом двигателя на котором проведен эксперимент.

Для оценки влияния спирта на содержание сажи в отработавших газах использована феноменологическая модель, основные положения которой представлены в работе [2].

Скорость сажеобразования в зоне горения топлив с различным элементарным составом предлагается рассчитывать с помощью уточненной зависимости:

$$\left( \frac{d[C]}{d\tau} \right)_k = M_{\tau} \frac{q_c}{V} \frac{dx}{d\tau}, \quad (1)$$

где  $V$  – текущий объем цилиндра;  
 $q_c$  – цикловая подача топлива;  
 $dx/d\tau$  – скорость тепловыделения.

Величина коэффициента  $M_{\tau}$  связана с элементарным составом топлива и определяется с помощью зависимости:

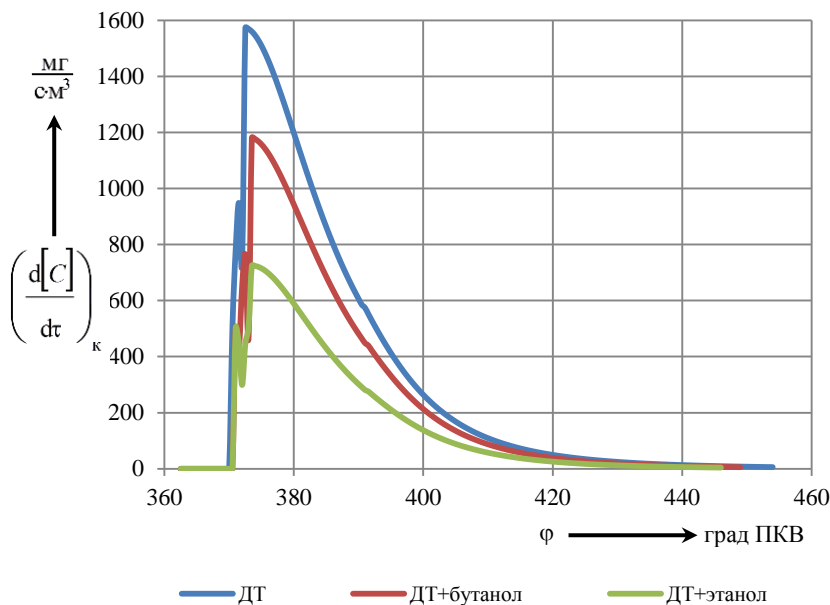
$$M_{\tau} = 18,957 q_c - 13,903, \quad (2)$$

где  $q_c$  – массовая доля углерода в топливе.

Методика расчета выбросов сажи, согласно работе [2] и предложенное уточнение реализованы в виде процедуры программы расчета рабочего цикла – МРПД. Для режима работы дизельного двигателя С100 выполнены расчетные исследования по определению выбросов сажи при использовании спиртодизельных смесей. Для исследования выбраны смеси дизельного топлива, содержащие 15 и 20 % бутанола и этанола соответственно. Как показали, ранее проведенные исследования, использование этих сме-

сей обеспечивает максимальные значения индикаторного КПД. Проведены также расчётные исследования при использовании МЭРМ и его смесей, содержащих 10 % этанола и бутанола соответственно.

На рисунках 1–3 представлены графики образования сажи в зоне горения, изменения концентрации сажи в цилиндре в результате расширения и результирующей скорости изменения концентрации сажи в цилиндре, соответственно при цикловой подаче топлива ( $152 \text{ мм}^2$ ), обеспечивающей заданный нагрузочный режим при использовании дизельного топлива.



**Рисунок 1** – Изменение скорости образования сажи в зоне горения при использовании спиртодизельных смесей (цикловая подача топлива  $152 \text{ мм}^2$ )

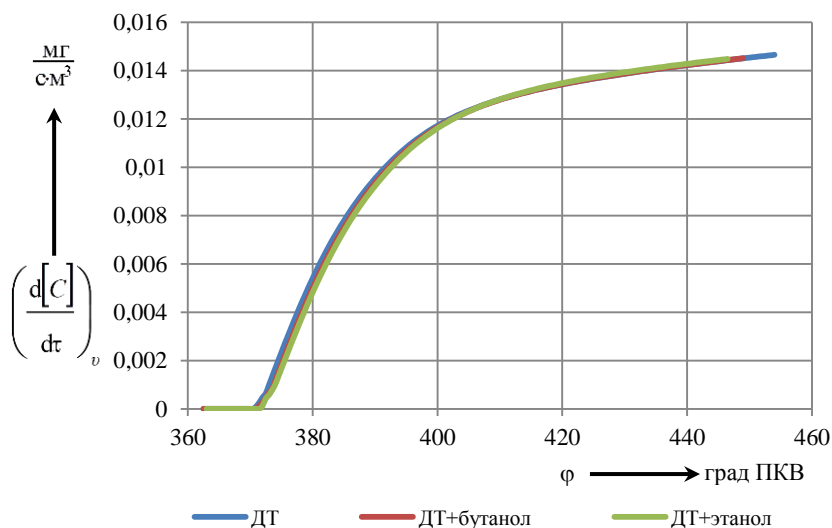
Графики из-за незначительности скоростей сажеобразования по механизму полимеризации ядер капель при протекании процесса впрыска и его окончании и выгорания сажи не приведены.

Характер протекания зависимостей, отражающих изменение  $\left(\frac{d[C]}{d\tau}\right)_k$  (рисунок 1), соответствуют характеристике тепловыделения. Наибольшее значение максимальной скорости образования сажи в зоне горения соот-

ветствует дизельному топливу. На снижение скорости  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_k$  при использовании спиртодизельных смесей оказывают два фактора: уменьшение максимального значения скорости тепловыделения и снижение массовой доли углерода.

Максимальное значение скорости  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_k$  по сравнению с дизельным топливом уменьшается при применении бутанола на 25 %, для смеси дизельного топлива и этанола снижение максимальной скорости образования сажи составляет 54 %.

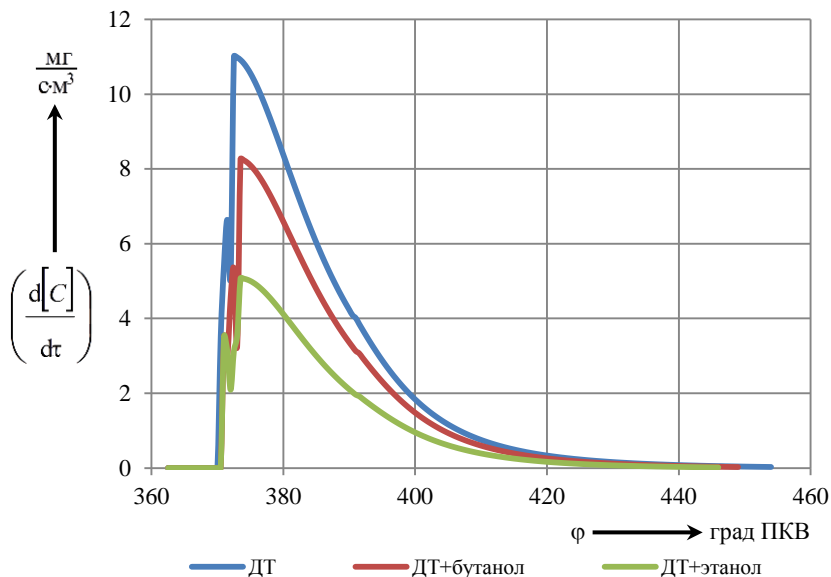
Скорость уменьшения концентрации сажи  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_b$  вследствие расширения последовательно увеличивается (рисунок 2). Характер кривых идентичен протеканию интегральных характеристик тепловыделения.



**Рисунок 2** – Скорость изменения концентрации сажи в цилиндре в результате расширения при использовании спиртодизельных смесей (цикловая подача топлива 152 мм<sup>2</sup>)

В начале процесса сгорания наблюдается некоторое превышение величины  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_0$ , соответствующей расчетам, выполненным для дизельного топлива, над значениями, полученными для смесевых топлив. Максимально это превышение над смесью дизельного топлива и бутанола составляет ~30 %, для смеси дизельного топлива с этанолом – 39 %.

На характер суммарной скорости образования сажи преобладающее влияние оказывает величина скорости сажеобразования в зоне горения (рисунок 3). Вследствие практически идентичного характера кривых, соответствующих скорости изменения концентрации сажи в цилиндре в результате расширения при использовании дизельного топлива и его смесей со спиртами происходит одинаковое снижение суммарных скоростей образования сажи.



**Рисунок 3** – Результирующая скорость изменения концентрации сажи в цилиндре при использовании спиртодизельных смесей (цикловая подача топлива 152 мм²)

Значения концентрации сажи, полученные на момент открытия выпускного клапана, были пересчитаны в значения коэффициента ослабления светового потока ( $N$ ). Так при использовании дизельного топлива величина  $N$  равна 9 %. При применении смеси дизельного топлива, содер-

жащей 15 % бутанола, величина  $N$  снижается на ~11 %, для смеси дизельного топлива и 20 % этанола уменьшение  $N$  составляет 24 %.

Использование смесевых топлив при неизменной цикловой подаче топлива приводит к снижению мощностных показателей. Для получения среднего индикаторного давления, соответствующего работе на дизельном топливе, в случае применения смесевых топлив требуется увеличение цикловой подачи топлива.

Увеличение расхода смесевых топлив не привело к изменению характера кривых скоростей изменения содержания сажи, однако возросли максимальные значения скорости образования сажи  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_k$ . По сравнению с расчетами при цикловой подаче топлива 152 мм<sup>2</sup> увеличение максимальной величины  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_k$  для смеси дизельного топлива и бутанола составляет 2,4 %, для дизель-этанольной смеси почти 8 %.

Рост скорости  $\left(\frac{d[C]}{dt}\right)_k$  привел к увеличению коэффициента ослабления светового потока. Показатель  $N$  при повышении среднего индикаторного давления до 2 МПа при использовании дизель-бутанольной смеси увеличился на 2,3 %, для дизель-этанольной рост составил 1,2 %. Необходимо отметить, что величина  $N$  при использовании спиртодизельной смесей оставалась ниже, чем при использовании дизельного топлива.

### Вывод

Для режима С100 испытательного цикла ESC автомобильного двигателя определена дымность отработавших газов при сгорании дизельного топлива и его смесей с бутанолом и этанолом. Установлено, что добавка в смесь с дизельным топливом 15 % бутанола приводит к снижению коэффициента ослабления светового потока на 11 %, а добавка 20 % этанола приводит к уменьшению этого показателя на 23 %.

### Литература

1. Левтеров, А.М. Анализ математических моделей механизма сажеобразования при сжигании углеводородных топлив / А.М. Левтеров, Л.И. Левтерева // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 5. – С. 130–141.
2. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков: Вища школа. Из-во при Харьк. ун-те, 1980. – 169 с.