

## Литература

1. Автомобильные перевозки и организация дорожного движения: справочник / В.У. Рэнкин [и др.]; пер с англ. – М.: Транспорт, 1981. – 592 с.
2. Лобашов, О.О. Моделирование влияния на транспортные потоки в містах / О.О. Лобашов. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 170 с.
3. Брайловский, Н.О. Моделирование транспортных систем / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 125 с.
4. Лобанов, Е.М. Транспортная планировка городов: учебник для студентов вузов / Е.М. Лобанов. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
5. Капитанов, В.Т. Управление транспортными потоками в городах / В.Т. Капитанов, Е.Б. Хилажев. – М.: Транспорт, 1985 – 94 с.
6. Иносэ, Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Т. Хамада; под. ред. М.Я. Блинкина; пер с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
7. Сильянов, В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.
8. Михайлов, А.Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.

УДК 621.436

### **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ**

### **FORECASTING OF WORKING PROCESS INDICATORS OF THE DIESEL ENGINE WHEN USING ALTERNATIVE FUELS**

*Кухаренок Г.М.*, доктор технических наук, профессор;

*Гершань Д.Г.*, ассистент

(Белорусский национальный технический университет)

*Kukharenok G.M.*, Doctor of Technical Sciences, Professor;

*Hershan D.G.*, Assistant

(Belarusian National Technical University)

**Аннотация.** *Разработана методика прогнозирования показателей рабочего процесса при использовании альтернативных топлив, позволяющая выбирать состав и свойства топлива. Проведены расчетные исследования по выбору состава и свойств топлива.*

**Abstract.** *The method of forecasting of working process indicators when using alternative fuels has been developed, which allows to choose composition*

*and properties of the fuel. Computational research for choice composition and properties of the fuel has been conducted.*

Показатели рабочего процесса двигателя существенно зависят от состава и свойств топлива. Их влияние неоднозначно и зависит от многих факторов: режимов работы двигателя, способов применения топлива на двигателе, организации рабочего процесса, условий эксплуатации. Поэтому получить универсальное топливо для всех случаев эксплуатации достаточно сложно.

Оценка влияния состава и свойств топлива на показатели рабочего процесса проводилась по следующей методике:

1. Определялся объект и режимы исследований.
2. Определялся диапазон изменения элементного состава и физических свойств топлива.
3. Разрабатывалась компьютерная программа расчета рабочего процесса двигателя, учитывающая характеристики топлива («МРЦД»).
4. Разрабатывались компьютерная модель течения топлива в носке распылителя («Распылитель–топливо–течение»).
5. Компьютерная модель развития топливных струй в камере сгорания («Топливные струи–камера сгорания»).
6. Составлялся план и проводился многофакторный расчетный эксперимент.
7. Строились регрессионные зависимости показателей рабочего процесса от состава и свойств топлива.
8. Графические зависимости и их анализ.
9. Оценка или выбор топлива.

На основании свойств существующих топлив выбраны для изучения следующие диапазоны изменения состава и свойств топлива [1, 2, 3, 4]:

Элементный состав:  $g_C$ ;  $g_H$ ;  $g_O$  – (0,33–0,87); (0,077–0,471); (0,01–0,37).

Плотность  $\rho$  – 790–890 кг/м<sup>3</sup>.

Динамическая вязкость  $\mu$  – 0,0012–0,0035 Па·с.

Поверхностное натяжение  $\sigma$  – 0,018–0,032 Н/м.

Рассматривался рабочий процесс дизеля 4ЧН11/12,5 для режима С100 13-режимного цикла ESC (частота вращения коленчатого вала – 2100 мин<sup>-1</sup>, крутящий момент – 618 Н·м).

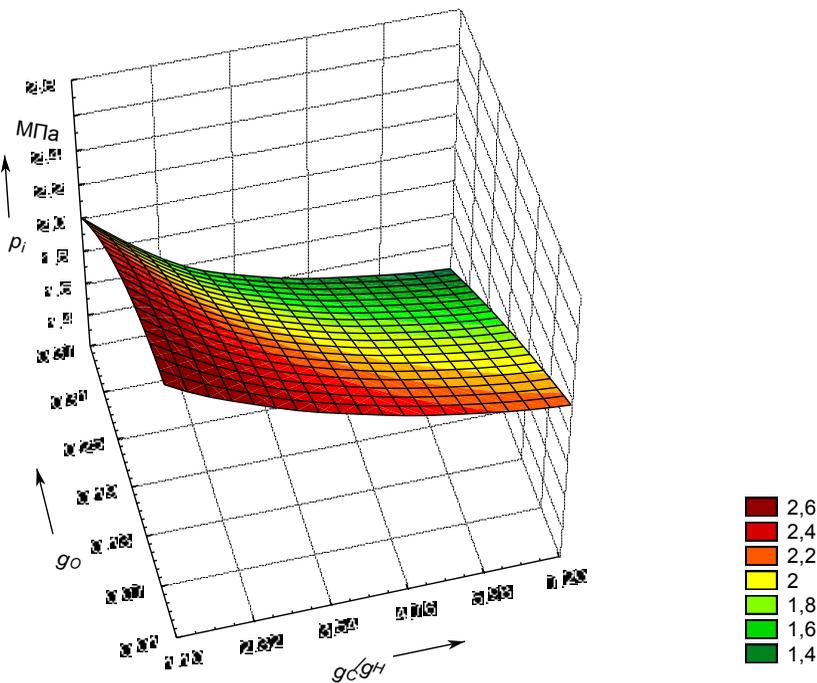
Исследования влияния содержания кислорода, углерода и водорода в топливе (при неизменных других свойствах) на показатели рабочего процесса рассмотрены при неизменных регулировочных и конструктивных параметров двигателя.

Показатели рабочего процесса дизеля на рассматриваемом режиме при работе на дизельном топливе следующие: среднее индикаторное давление

$p_i - 2,08$  МПа; удельный индикаторный расход топлива  $g_i - 178,5$  г/(кВт·ч); выброс окислов азота  $NO_x - 408,3$  г/ч; удельный выброс окислов азота  $g_{NO_x} - 2,36$  г/(кВт·ч).

Состав и свойства дизельного топлива:  $g_C; g_H; g_O = 0,864; 0,121; 0,015$ ;  $\rho = 840$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,00335$  Па·с;  $\sigma = 0,028$  Н/м.

Зависимости среднего индикаторного давления и удельного индикаторного расхода топлива от доли кислорода  $g_O$  в топливе и отношения долей углерода и водорода  $g_C/g_H$  представлены на рисунках 1 и 2.

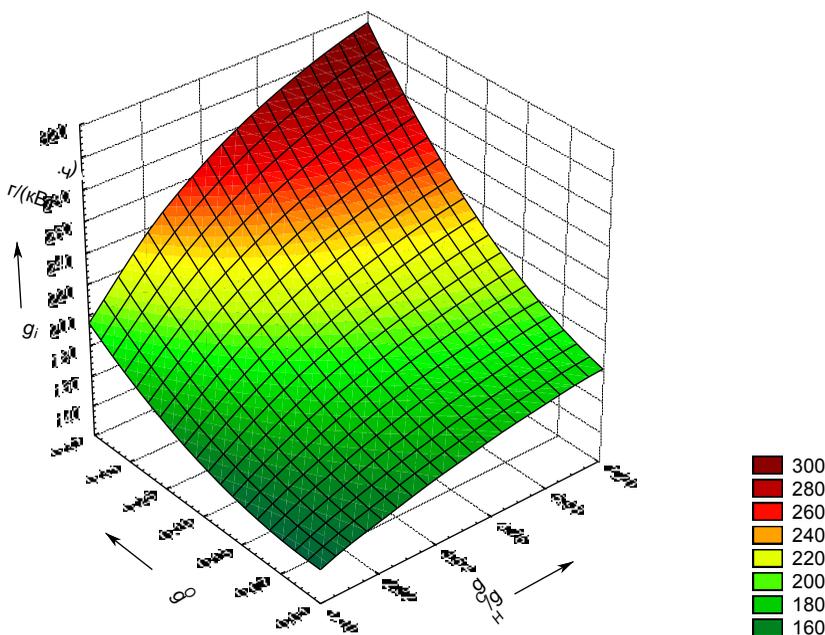


**Рисунок 1** – Зависимость среднего индикаторного давления от доли кислорода в топливе и отношения долей углерода и водорода

С ростом доли кислорода во всем диапазоне отношения долей углерода и водорода топлива среднее индикаторное давление снижается. Также оно снижается с ростом отношения  $g_C/g_H$  при всех рассматриваемых значениях  $g_O$ . Соответственно максимальное значение среднего индикаторного давления достигается при доле кислорода в топливе 0,01 и отношения долей углерода и водорода 1,1 и составляет 2,75 МПа. Минимальное значение  $p_i$

равное 1,24 МПа получается при максимальных значениях рассматриваемых диапазонов  $g_O$  и  $g_C/g_H$  равных 0,37 и 7,2 соответственно. Изменение среднего индикаторного давления по сравнению с работой двигателя на дизельном топливе для максимального и минимального значений составляет 32,2 и 40,4 %.

Как видно из рисунка 2 с увеличением отношения  $g_C/g_H$  удельный индикаторный расход топлива растет при всех значениях  $g_O$  рассматриваемого диапазона. Причем, чем больше  $g_O$ , тем интенсивней растет удельный индикаторный расход топлива.



**Рисунок 2** – Зависимость удельного индикаторного расхода топлива от доли кислорода в топливе и отношения долей углерода и водорода

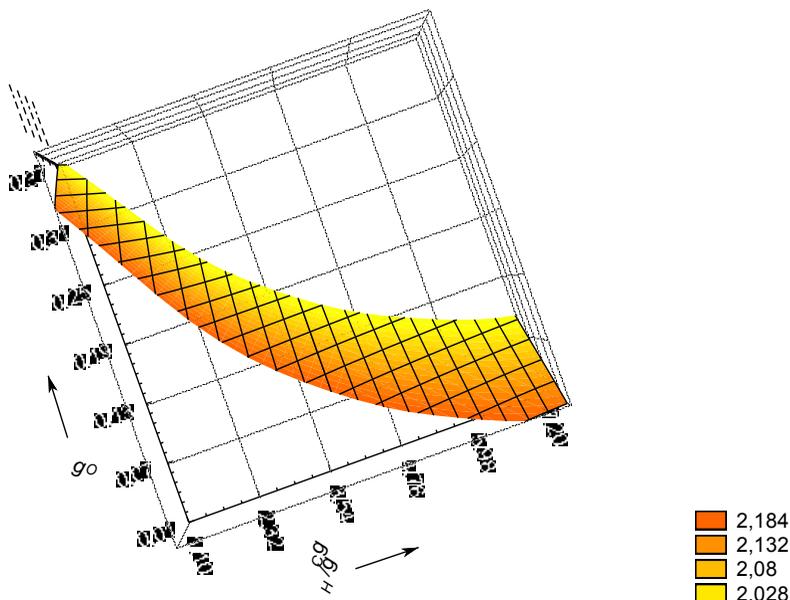
В зависимости от доли кислорода удельный индикаторный расход также растет при ее увеличении во всем диапазоне отношения  $g_C/g_H$  и рост этот тем интенсивней, чем больше отношение  $g_C/g_H$ .

Соответственно минимальный удельный индикаторный расход топлива составляет 141,8 г/(кВт·ч) при  $g_O$  и  $g_C/g_H$  равных 0,01 и 1,1, а максимальный – 313,7 г/(кВт·ч), при  $g_O$  и  $g_C/g_H$  равных 0,37 и 7,2.

Изменение удельного индикаторного расхода топлива по сравнению с работой двигателя на дизельном топливе для максимального и минимального значений составляет 20,6 и 75,7 %.

Соответствие определенным требованиям рабочего процесса может быть получено различным сочетанием углерода, водорода и кислорода в топливе.

На рисунке 3 показано изменение среднего индикаторного давления в пределах 5 % от значения, получаемого при работе на дизельном топливе от доли кислорода в топливе и отношения долей углерода и водорода.



**Рисунок 3** – Зависимость среднего индикаторного давления от доли кислорода в топливе и отношения долей углерода и водорода

Как видно из представленного графика увеличивая долю кислорода в топливе необходимо снижать отношение долей углерода и водорода, чтобы оставаться в пределах 5 % по  $p_i$  в сравнении со значением, получаемым при работе на дизельном топливе.

Например, 25 % смесь *n*-бутанола с дизельным топливом имеет следующий состав  $g_C; g_H; g_O = 0,81; 0,125; 0,065$ ;  $g_C/g_H = 6,48$ , при этом  $p_i = 2,06$  МПа, что лежит в пределах 5 %. 25% смесь метанола с дизельным топливом имеет следующий состав  $g_C; g_H; g_O = 0,742; 0,122; 0,136$ ;  $g_C/g_H = 6,08$ , при этом  $p_i = 1,91$  МПа, не лежит в пределах 5 %.

Для определения влияния значений плотности, вязкости и поверхностного натяжения, а также их сочетаний на показатели рабочего процесса проведено планирование эксперимента с использованием насыщенного близкого к D-оптимальному плана для трех изменяемых параметров. Постоянство заданного режима поддерживалось путем изменения цикловой подачи топлива.

В результате получены регрессионные зависимости удельного индикаторного расхода топлива и удельного выброса окислов азота от плотности, вязкости и поверхностного натяжения, г/(кВт·ч):

$$g_i = 179,5 - 2,29375 \cdot \rho^* - 3,0625 \cdot \mu^* - 5,6625 \cdot \sigma^* + 0,49375 \cdot (\rho^*)^2 + 1,9125 \cdot (\mu^*)^2 + 2,5125 \cdot (\sigma^*)^2 + 0,1375 \cdot \rho^* \cdot \mu^* + 0,3375 \cdot \rho^* \cdot \sigma^* + 3,725 \cdot \mu^* \cdot \sigma^*, \quad (1)$$

$$g_{NO_x} = 2,36 + 0,280625 \cdot \rho^* + 0,15625 \cdot \mu^* + 0,60125 \cdot \sigma^* + 0,099375 \cdot (\rho^*)^2 - 0,10375 \cdot (\mu^*)^2 - 0,47875 \cdot (\sigma^*)^2 + 0,04125 \cdot \rho^* \cdot \mu^* - 0,13875 \cdot \rho^* \cdot \sigma^* - 0,3475 \cdot \mu^* \cdot \sigma^*, \quad (2)$$

где  $\rho^*$ ,  $\mu^*$ ,  $\sigma^*$  – приведенные значения изменяемых параметров в натуральном масштабе измерений.

Проведен анализ полученных регрессий.

Например, удельный индикаторный расход топлива снижается при увеличении плотности для всех значений вязкости рассматриваемого диапазона при поверхностном натяжении 0,025 Н/м. С увеличением вязкости  $g_i$  падает в области минимальных значений плотности, а в области максимальных значений – падает, а затем начинает расти. Наименьший удельный индикаторный расход топлива достигается при плотности и вязкости, равных 890 кг/м<sup>3</sup> и 0,00323 Па·с и составляет 176,6 г/(кВт·ч). Удельный выброс окислов азота увеличивается при повышении плотности. Также  $g_{NO_x}$  увеличивается при повышении  $\mu$  для всех рассматриваемых значений  $\rho$ . Интенсивность данного увеличения падает при приближении к максимальным значениям вязкости и падение тем больше, чем ниже плотность. Минимальный удельный выброс окислов азота достигается при вязкости и плотности, равных 0,0012 Па·с и 790 кг/м<sup>3</sup> соответственно и составляет 1,96 г/(кВт·ч).

При значении  $\sigma = 0,03$  Н/м удельный выброс окислов азота с увеличением вязкости растет, а затем начинает снижаться для всего диапазона зна-

чений плотности. При этом с уменьшением плотности максимальные значения выбросов сдвигаются в сторону меньшей вязкости. Минимальное значение  $g_{NOx}$  составляет 2,23 г/(кВт·ч) и получается при наименьшем  $\rho$  и наибольшем из рассматриваемых  $\mu$  равным соответственно 790 кг/м<sup>3</sup> и 0,0035 Па·с. Наименьшее  $g_p$ , составляющее 175,2 г/(кВт·ч), получается при  $\rho$  и  $\mu$  – 890 кг/м<sup>3</sup> и 0,00243 Па·с.

Проведенные исследования показывают, что с уменьшением отношения долей углерода и водорода при одинаковом содержании кислорода показатели рабочего процесса улучшаются. Наличие кислорода в топливе положительно влияет на протекание процесса сгорания, однако уменьшает теплотворную способность топлива.

Влияние значений плотности, вязкости и поверхностного натяжения топлива в отдельности на показатели рабочего процесса неоднозначно. Определяющее влияние на улучшение показателей рабочего процесса оказывает сочетание значений плотности, вязкости и поверхностного натяжения. Во многом это связано с тем, что процессы смесеобразования и сгорания существенно зависят от процессов впрыскивания и распыливания топлива, качество которых тесно связано с сочетанием данных значений.

Значительное отличие свойств и состава топлива от дизельного топлива требует существенного изменения регулировочных и конструктивных параметров дизеля. Для того чтобы с одной стороны улучшить показатели рабочего процесса, а с другой ограничиться небольшими переделками двигателя требуется из всего многообразия значений различных свойств топлива и их сочетаний выбрать наиболее подходящие проведя соответствующие исследования. На основании проведенных исследований наилучшими для данных требований является топливо со свойствами, которым из реально существующих топлив может соответствовать смесь бутанола и дизельного топлива.

Изменения предъявляемых требований и вводимых ограничений будут приводить к изменению состава и свойств топлива, дающих наилучшее обеспечение требуемых показателей рабочего процесса.

В дальнейшем приведенная выше методика расчета позволяет выбирать составы (реальных) смесевых топлив или нескольких топлив при раздельной подаче на различных режимах двигателя без значительных изменений его мощностных или экономических показателей. Определять составы, при которых достаточно изменить регулировочные параметры для обеспечения работы двигателя с требуемыми характеристиками, а также определить значения составов топлив, при которых на данном двигателе необходимо выполнить значительные или незначительные конструктивные изменения с или без изменения регулировочных параметров с целью обеспечения требуемой его работы.

## Литература

1. Емельянов, В.Е. Автомобильный бензин и другие виды топлива: свойства, ассортимент, применение / В.Е. Емельянов, И.Ф. Крылов. – М.: Астрель: АСТ: Профиздат, 2005. – 207 с.
2. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 479 с.
3. Автомобильный справочник / пер. с англ. ООО «СтарСПб». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2012. – 1280 с.
4. Данилов, А.М. Альтернативные топлива: достоинства и недостатки. Проблемы применения / А.М. Данилов, Э.Ф. Каминский, В.А. Хавкин // Российский химический журнал. – 2003. – № 6. – С. 4–11.

УДК 621.436

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СПИРТСОДЕРЖАЩИХ ТОПЛИВАХ RESEARCH OF THE COMBUSTION PROCESS OF THE DIESEL ENGINE OPERATING ON FUEL CONTAINING ALCOHOL

*Кухаренок Г.М.*, доктор технических наук, профессор;

*Петрученко А.Н.*, кандидат технических наук, доцент;

*Гершань Д.Г.*, ассистент

(Белорусский национальный технический университет)

*Kukharenok G.M.*, Doctor of Technical Sciences, Professor;

*Petruchenko A.N.*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

*Hershan D.G.*, Assistant

(Belarusian National Technical University)

**Аннотация.** Проведены исследования процесса сгорания на модернизированной одноцилиндровой установке при работе на дизельном топливе, метиловом эфире рапсового масла и их смесях с бутиловым и этиловым спиртами при степенях сжатия 16, 18 и 20. Объемное содержание спиртов в смесях составляло 10, 20, 30 и 40 %.

**Abstract.** The research of combustion process on modernized single-cylinder installation when operating on diesel fuel, rapeseed oil methyl ester and their mixtures with butyl and ethyl alcohol has been conducted at compression ratios 16, 18 and 20. The volume content of alcohol in the mixture was 10, 20, 30 and 40 %.