

## Литература

1. Кухарёнок, Г.М. Показатели работы дизеля с рециркуляцией отработавших газов при применении спиртосодержащих топлив [Текст] / Кухаренко Г.М, Петрученко А.Н. // Совершенствование организации дорожного движения и перевозок пассажиров и грузов: сборник научных трудов / Филлиал БНТУ «Научно-исследовательская часть». – Минск, 2014. – С. 203–207.
2. Кухаренко, Г.М. Снижение выбросов вредных веществ дизельных двигателей [Текст] / Г.М. Кухаренко, А.Н. Петрученко, В.И. Березун. – Минск, 2013. – 248 с.
3. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст] / К. Хартман [и др.]. – Москва: Мир, 1977. – 552 с.

УДК 621. 436

### ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА СМЕСЯХ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА И МЕТИЛОВОГО ЭФИРА ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАПСОВОГО МАСЛА

### INDICATORS WORKING PROCESS OF A DIESEL ENGINE RUNNING ON DIESEL OIL, AND MIXTURES OF THE METHYL ESTER OF RAPESEED OIL FATTY ACIDS

*Кухарёнок Г.М.*, доктор технических наук, профессор;  
*Петрученко А.Н.*, кандидат технических наук, доцент;  
*Капский Д.В.*, доктор технических наук, доцент  
(Белорусский национальный технический университет)

*Kukharenok G.M.*, Doctor of Technical Sciences, Professor;  
*Petruchenko A.N.*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;  
*Kapski D.V.*, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor  
(Belarusian National Technical University)

**Аннотация.** *Получены экономические и мощностные показатели дизеля при работе на смесях дизельного топлива и метилового эфира жирных кислот рапсового масла, а также характеристики топливоподачи и процесса сгорания. С ростом концентрации метилового эфира увеличивается максимальное давление впрыска топлива, снижается период задержки воспламенения, повышается максимальная скорость сгорания топлива, снижается среднее индикаторное давление и увеличивается удельный индикаторный расход топлива.*

**Abstract.** *The economic and power characteristics of the diesel engine when operating on mixtures of diesel fuel and methyl ester of fatty acids of rapeseed*

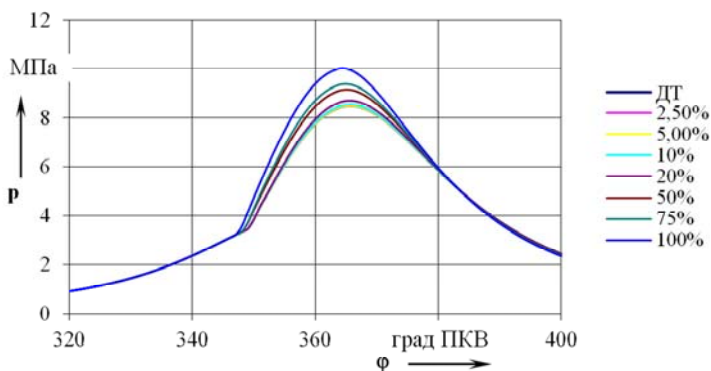
oil and the characteristics of fuel delivery and combustion process. With increasing concentration of methyl ester is increased the maximum pressure of fuel injection decreases the ignition delay period increases the maximum rate of fuel combustion, reduced mean indicated pressure indicator and increases the specific fuel consumption.

Для оценки влияния физико-химических свойств дизельного топлива, содержащего различное количество метилового эфира жирных кислот рапсового масла МЭРМ, на показатели работы дизеля выполнены расчетные исследования.

В качестве исходных данных, для проведения расчета, использовались параметры, соответствующие дизелю 4Ч 11×12,5 с топливной системой непосредственного действия разделенного типа. Исследования проводились для режима номинальной мощности ( $N_e = 59,6$  кВт,  $n = 2200$  мин<sup>-1</sup>) при неизменных регулировочных и конструктивных параметрах. Концентрация МЭРМ в дизельном топливе составляла 2,5 %, 5 %, 10 %, 20 %, 30 %, 50 % и 75 %. Содержание МЭРМ в смеси определялось по массе. Для проведения сравнительного анализа расчетные исследования проводились для дизеля работающего и на «чистом» МЭРМ.

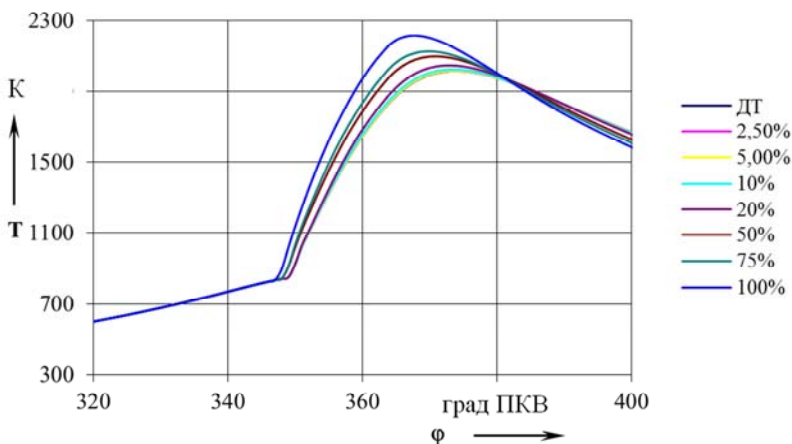
В качестве оценочных показателей работы дизеля на смесевых топливах были приняты его экономические и мощностные характеристики, а также характеристики топливоподачи и процесса сгорания.

Изменение давления и температуры газов в цилиндре дизеля работающего на смесевых топливах с различной концентрацией МЭРМ приведены на рисунках 1 и 2.



**Рисунок 1** – Индикаторные диаграммы дизеля, работающего на топливе, содержащем различное количество МЭРМ

Максимальные значения температуры, давления и скорости нарастания давления газов получены путем обработки расчетных индикаторных диаграмм и зависимостей изменения температуры газов в цилиндре при протекании рабочего цикла с использованием дизельного топлива с различной концентрацией МЭРМ.



**Рисунок 2** – Изменение температуры газов в цилиндре дизеля, работающего на топливе, содержащем различное количество МЭРМ

Как видно из индикаторных диаграмм по мере увеличения концентрации МЭРМ в дизельном топливе происходит рост максимального давления цикла. При концентрации МЭ 2,5; 5 и 10 % прирост максимального давления не существен – менее 1%. Дальнейшее увеличение содержания МЭРМ ведет к интенсивному росту максимального давления. Например, при содержании 20 % МЭРМ в дизельном топливе увеличение максимального давления составляет 2,5 %. Дальнейший рост концентрации МЭРМ ведет не только к росту максимального давления цикла, но и к смещению этого экстремума в сторону ранних углов. Наиболее высокая величина максимального давления соответствует работе дизеля на «чистом» МЭРМ, увеличение максимального давления составляет 18 %. При этом экстремальное значение давления достигается на 2 град ПКВ раньше по сравнению с нефтяным дизельным топливом.

Увеличение максимального давления цикла при росте концентрации МЭРМ сопровождается повышением скорости нарастания давления. Также интенсивно происходит снижение давления в цилиндре на такте рас-

ширения по мере увеличения количества МЭРМ в топливе. При этом давление в конце такта расширения оказывается ниже при использовании топлива с более высокой концентрацией МЭРМ.

Из анализа зависимостей изменения температуры газов при протекании рабочего процесса дизеля, работающего на топливах, содержащих различное количество МЭРМ, следует, что увеличении концентрации МЭРМ ведет к росту максимальной температуры цикла. При концентрации МЭРМ в смесевом топливе до 10 % максимальная температура цикла практически не меняется.

Рост максимальной температуры при использовании в качестве топлива «чистого» МЭРМ менее 10 %, при этом этот максимум достигается на 6 град ПКВ раньше по сравнению с дизельным топливом. Увеличение концентрации МЭРМ ведет также к уменьшению периода между моментами достижения максимального давления и максимальной температуры цикла.

Интенсивное снижение температуры на такте расширения наблюдается при увеличении концентрации МЭРМ в смесевом топливе, что ведет к уменьшению температуры конца расширения.

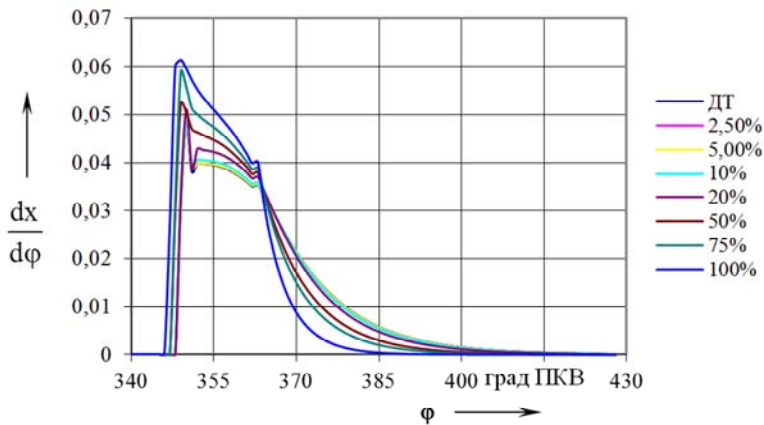
Увеличение максимальных значений температуры и давления при моделировании рабочего процесса дизеля, работающего на 5 % смеси МЭРМ с дизельным топливом составляет 0,1 %.

Как видно из зависимостей, приведенных на рисунке 3, увеличение концентрации МЭРМ в смесевом топливе вызывает рост максимальной скорости сгорания  $\frac{dx}{d\varphi}$ , по сравнению с дизельным топливом эта величина выше на 30 %. Сгорание «чистого» МЭРМ начинается раньше на 2 град ПКВ, чем дизельного и его смесей с концентрацией МЭРМ до 10 %. Таким образом, основными факторами, определяющими высокие значения скорости нарастания давления и максимального давления цикла является высокая максимальная скорость сгорания топлива и более раннее его воспламенение.

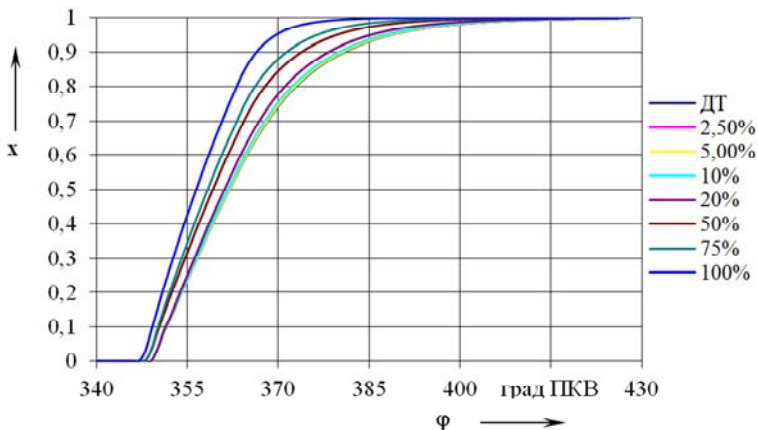
Снижение периода задержки воспламенения, вызванное меньшими значениями энергии активации у смесевых топлив с большей концентрацией МЭРМ, должно вести к уменьшению количества топлива накопившегося в цилиндре дизеля за это время, и, как следствие, к снижению скорости нарастания давления и его максимального значения. Однако этого не происходит, очевидно, изменение физических свойств топлив оказывает влияние на процесс топливоподачи.

С увеличением содержания МЭРМ в смеси скорость сгорания увеличивается. Это обеспечивает выгорание более половины цикловой порции для «чистого» МЭРМ за 9 град ПКВ, в то время как эта же доля топлива для нефтяного и смесевых топлив с концентрацией МЭРМ до 10 % выгорает за

12 град ПКВ (рисунок 4). Следствием такого сгорания является рост максимальной температуры цикла и ранее достижение этой величиной своего максимума.



**Рисунок 3** – Дифференциальные характеристики выгорания топлива в цилиндре дизеля, содержащего различное количество МЭРМ



**Рисунок 4** – Интегральные характеристики выгорания топлива в цилиндре дизеля, содержащего различное количество МЭРМ

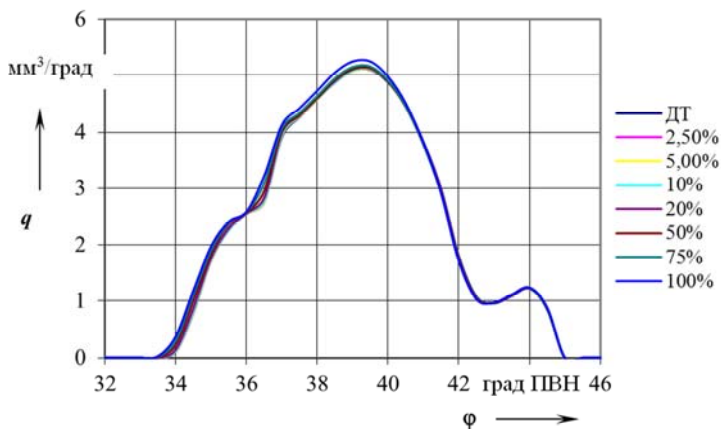
Физические свойства смесевых топлив оказывают влияние на продолжительность сгорания топлива ( $\varphi_z$ ). Увеличение концентрации МЭРМ в смесевом топливе в начале сокращает продолжительность выгорания топлива, а затем его увеличивает. Своего минимума этот параметр достигает при 50 % концентрации МЭРМ в смесевом топливе, абсолютное значение  $\varphi_z$  равно 74,5 град ПКВ. Затем с ростом концентрации МЭРМ продолжительность выгорания достаточно быстро увеличивается, впоследствии, превышая величину  $\varphi_z$ , соответствующую нефтяному топливу, которое выгорает на 3 град ПКВ раньше чем «чистый» МЭРМ.

С одной стороны увеличение концентрации МЭРМ в дизельном топливе ведет к росту коэффициента избытка воздуха, что сокращает время выгорания топлива. С другой рост сил поверхностного натяжения ( $\sigma_{CM}$ ) увеличивает средний диаметр капель топлива, распыленного в камере сгорания, что повышает время их испарения. Изменения таких параметров смесевое топливо как его вязкость и плотность также влияют на размер капель. Таким образом, между продолжительностью выгорания смесевое топливо и его физико-химическими свойствами существует сложная функциональная связь. При малых концентрациях МЭРМ в смесевом топливе увеличение средней скорости впрыскивания компенсирует влияние возрастающего коэффициента поверхностного натяжения на величину среднего диаметра капель топлива, а рост коэффициента избытка воздуха уменьшает значение параметра  $\varphi_z$ . В дальнейшем величина капель существенно возрастает. При концентрации МЭРМ более 50 % испаряемость топлива снижается из-за значительного роста размера капель, в то время как коэффициент избытка воздуха увеличивается лишь на 3 % в случае применения «чистого» МЭРМ.

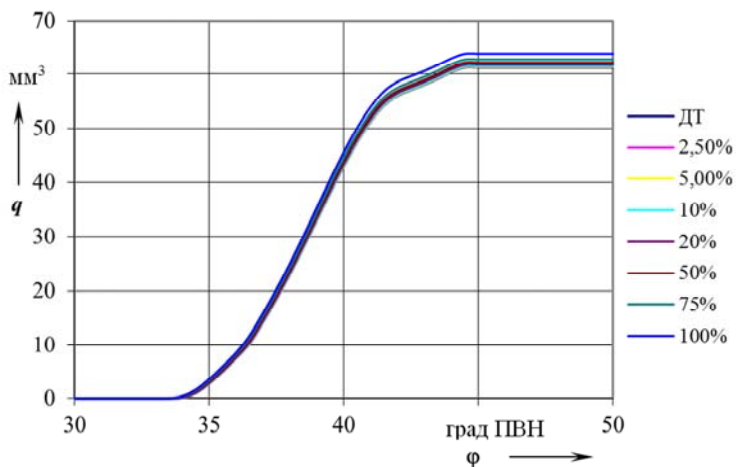
Для оценки влияния особенностей впрыскивания топлива на показатели рабочего цикла дизеля, работающего на смесевом топливе, целесообразно проанализировать характеристики впрыска топлива, представленные на рисунках 5 и 6.

Как следует из приведенных дифференциальных характеристик, повышение концентрации МЭРМ в смесевом топливе, более 50 %, приводит к раннему началу впрыска топлива (1 град ПКВ) и росту цикловой подачи при неизменных регулировочных и конструктивных параметрах топливной аппаратуры на 4 % по объёму и 10,2 % по массе. В тоже время за период задержки воспламенения «чистого» МЭРМ подается меньше, чем нефтяного дизельного топлива. Впрыск 5% смеси дает увеличение цикловой порции на 0,2 % по отношению к нефтяному дизельному топливу.

Одним из факторов, определяющим высокие скорости сгорания «чистого» МЭРМ, является то, что значительное количество топлива впрыскивается в цилиндр в период развитого горения, что ведет к его быстрому сгоранию и росту максимальной температуры.

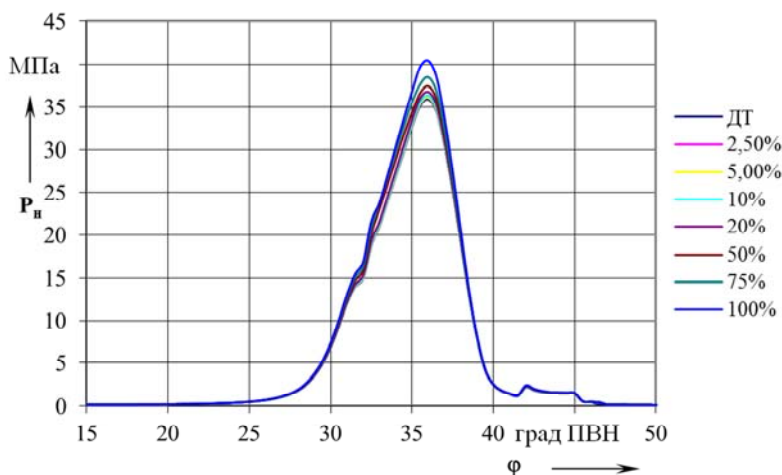


**Рисунок 5** – Дифференциальные характеристики топливоподачи для различных топлив



**Рисунок 6** – Интегральные характеристики законов топливоподачи для различных топлив

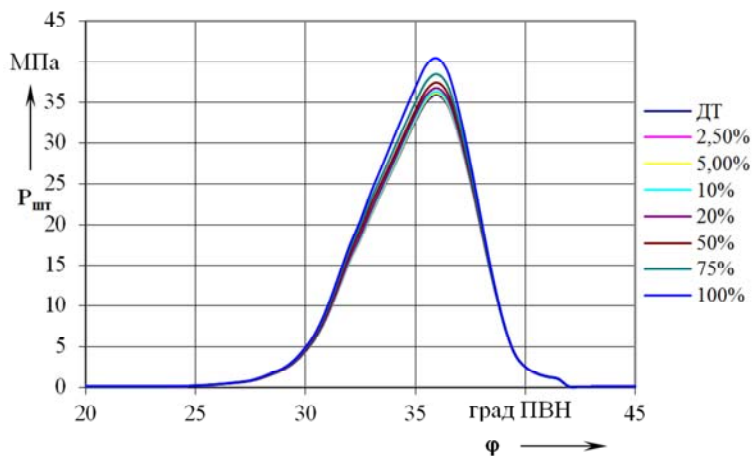
Из анализа зависимостей, представленных на рисунках 7–9, следует, что увеличение количества МЭРМ в смеси повышает вязкость топлива, а это приводит с одной стороны к уменьшению объёмных потерь топлива в сопряжениях втулка-плунжер и распылитель-игла, с другой к увеличению потерь энергии впрыскивании в волновых процессах, возникающих в линии высокого давления. На изменение характеристик топливоподачи определяющее значение оказывает уменьшение объёмных потерь. Раннее истечение топлива в случае впрыскивания МЭРМ обусловлено интенсивным ростом давления во всех характерных полостях топливоподающей системы. Для смесевых топлив содержащих более 50 % МЭРМ открытие нагнетательного клапана начинается на 1 град ПКВ раньше. Однако волна давления достигает кармана распылителя форсунки для всех топлив одновременно. Продолжительность распространения волны давления от штуцера топливного насоса до кармана распылителя составляет 8 град ПКВ.



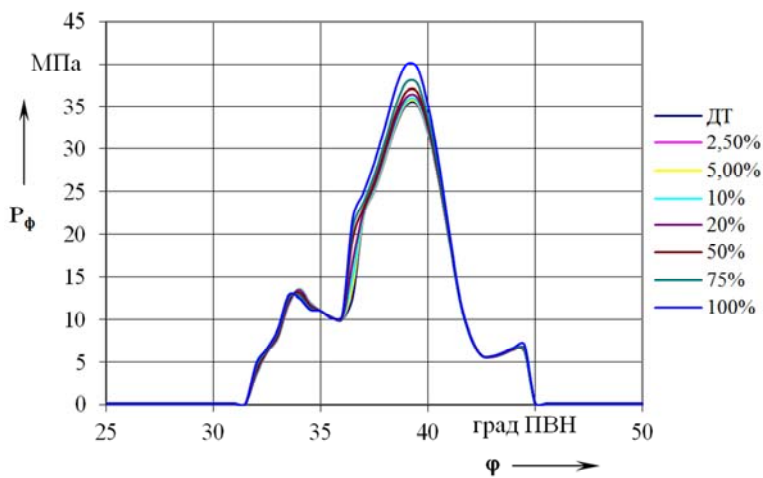
**Рисунок 7** – Изменение давления в надплунжерном пространстве для смесевых топлив с различной концентрацией МЭРМ

Высокая динамика развития процесса подачи МЭРМ в цилиндр дизеля ведет к росту максимального давления впрыскиваемой жидкости во всех контрольных полостях более чем на 4,5 МПа по сравнению дизельным топливом. В тоже время при работе на 5 % смеси увеличение давления составляет 0,6 % по отношению к дизельному топливу.





**Рисунок 8** – Изменение давления в штуцере топливного насоса для смесевых топлив с различной концентрацией МЭРМ



**Рисунок 9** – Изменение давления в кармане распылителя для смесевых топлив с различной концентрацией МЭРМ

После отсечки давление в контрольных участках топливоподающей аппаратуры выравнивается интенсивнее с увеличением количества МЭРМ

в смесевом топливе. Увеличение, а затем быстрое падение давления обусловлены увеличением плотности смесового топлива. Плотность определяет скорость распространения волн давления в жидкой среде, что наряду со снижением объёмных потерь обуславливает ранее начало впрыска топлива и быстрое снижение давления в линии нагнетания.

Увеличение давления впрыскиваемого топлива вызывает интенсивное его истечение из сопловых отверстий распылителя, что способствует росту количества впрыскиваемого в цилиндр топлива. Этот процесс носит нестационарный характер, что сказывается на количестве поданного в цилиндр топлива за период задержки воспламенения для топлив, содержащих различное количество МЭРМ.

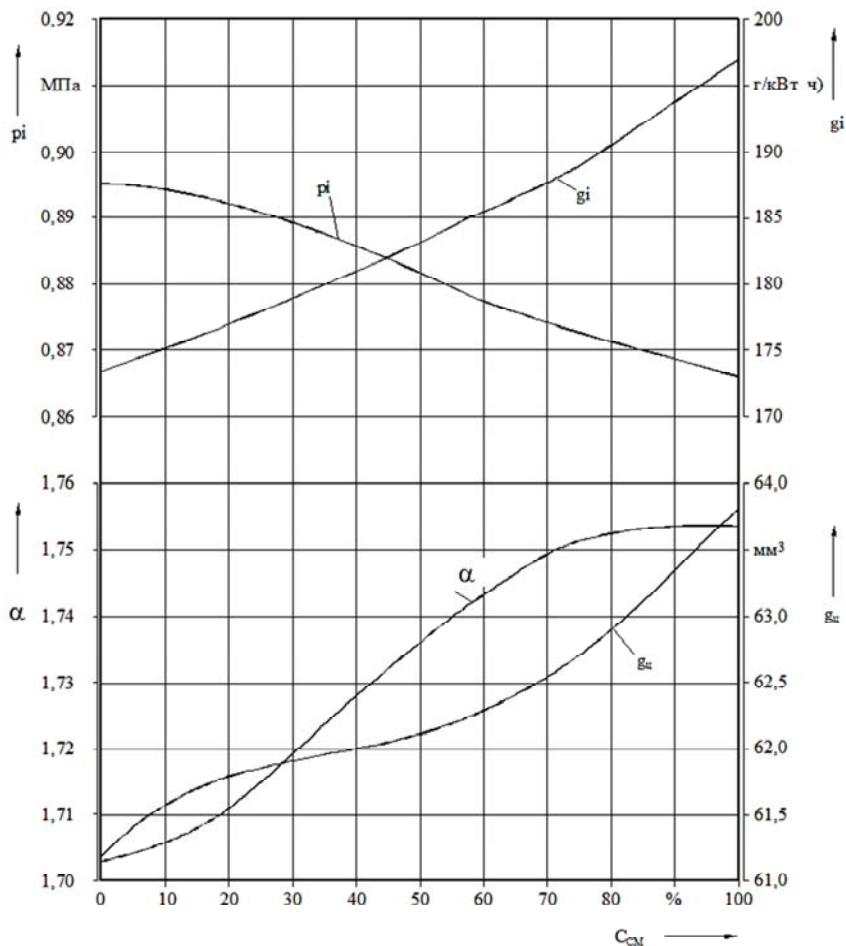
Изменения в характере процесса сгорания с увеличением количества МЭРМ в смесевом топливе, а также уменьшение теплотворности смеси отразились на мощностных и экономических показателях дизеля. При концентрации МЭРМ до 5 % эти показатели двигателя практически не меняются. Увеличение концентрации МЭРМ в смеси до 10 % не значительно сказывается на снижении мощности и экономичности дизеля – уменьшение среднего индикаторного давления составляет 0,2 %, а рост удельного индикаторного расхода топлива 1,1 %. Дальнейшее увеличение содержания МЭРМ в смесевом топливе приводит к существенным изменениям в мощностных и экономических показателях дизеля. При работе дизеля на «чистом» МЭРМ средний индикаторных расход увеличивается на 12,7 %, а среднее индикаторное давление снижается на 3,3 %.

На рисунках 10 и 11 представлены зависимости изменения удельного индикаторного расхода топлива  $g_i$ , среднего индикаторного давления  $P_i$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , цикловой подачи топлива  $g_{ц}$ , максимальных давления  $P_{max}$  и температуры  $T_{max}$  цикла, скорости нарастания давления  $\frac{dp}{d\varphi}$  и продолжительности выгорания топлива  $\varphi_z$  в зависимости от концентрации  $C_{CM}$  МЭРМ в смесевом топливе.

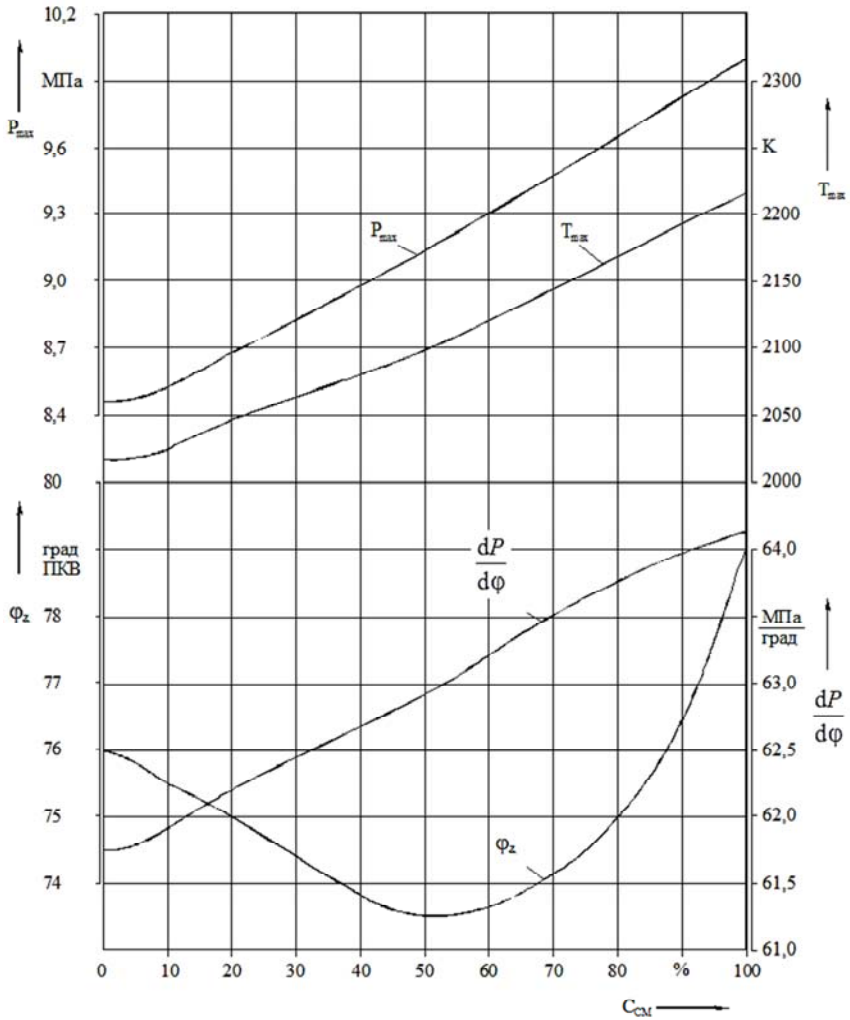
Рост концентрации метилового эфира в смесевом топливе ведет к снижению среднего индикаторного давления и увеличению расхода топлива. Снижение среднего индикаторного давления и увеличение удельного индикаторного расхода топлива при работе на 10% смеси соответственно составляет 0,2 % и 1,1 %. Относительное ухудшение этих же показателей для 50 % смеси составляет соответственно 1,5 %, 5,7 %.

Увеличение содержания метилового эфира в смеси ведет к росту максимального давления впрыска топлива, снижению периода задержки воспламенения и увеличению максимальной скорости сгорания топлива при росте объёмной скорости истечения топлива в начальной фазе процесса впрыска, что в значительной мере обуславливает рост максимальных зна-

чений давления и температуры цикла. Относительное увеличение максимальных значений температуры и давления при применении 10% смеси метилового эфира и нефтяного топлива соответственно составляет 0,4% и 0,7%, а при работе на 50% смеси эти же показатели увеличиваются соответственно на 3,2% и 7,4%.



**Рисунок 10** – Изменение среднего индикаторного давления, удельного эффективного расхода топлива, коэффициента избытка воздуха и цикловой подачи от концентрации МЭРМ в топливной смеси



**Рисунок 11** – Изменение максимальных температуры и давления цикла, условной продолжительности сгорания и скорости нарастания давления от концентрации МЭРМ в топливной смеси