

УДК 631.372.43.03

С.А. Плотников<sup>1</sup>, П.Н. Черемисинов<sup>1</sup>, П.И. Бажан<sup>2</sup>, Л.А. Захаров<sup>2</sup>**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВКОЙ РАПСОВОГО МАСЛА**Вятский государственный университет, г. Киров<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

В настоящее время фирмы-производители тракторов и автомобилей поставлены в такие условия, что вынуждены снижать токсичность отработавших газов двигателей. В итоге все чаще стали применять так называемые альтернативные топлива. Для европейских условий наиболее перспективным считается масло, получаемое из семян рапса. Его использование возможно в дизельных двигателях, как в чистом виде, так и после химической переработки. Объектом исследования является процесс сгорания в дизеле 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе с добавкой рапсового масла. Целью исследования явилось построение номограмм для определения периода задержки воспламенения, фазы быстрого горения, индикаторной диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе с добавкой рапсового масла.

*Ключевые слова:* дизельное топливо, биотопливо, рапсовое масло, вязкость, процесс сгорания, тепловыделение, период задержки воспламенения, фаза быстрого горения.

В мире наблюдается истощение запасов нефти, продукты переработки которой являются основным источником энергии для мобильных транспортных средств. Такая ситуация вынуждает двигателестроителей искать им замену. К этому же подталкивает и осложняющаяся экологическая ситуация. В настоящее время фирмы-производители тракторов и автомобилей поставлены в такие условия, что вынуждены снижать токсичность отработавших газов двигателей. В итоге все чаще стали применять так называемые альтернативные топлива, в частности, топлива, получаемые из растительных масел. Для европейских условий наиболее перспективным считается масло, получаемое из семян рапса. Его использование возможно в дизельных двигателях, как в чистом виде, так и после химической переработки [1-3].

Рапсовое масло имеет ряд достоинств по сравнению с дизельным топливом (ДТ): масло не токсично и не огнеопасно, не содержит сернистых соединений, является возобновляемым топливом, использование рапсового масла (РМ) не нарушает баланс двуокиси углерода (парникового газа) в природе. Применение рапсового масла (РМ) в чистом виде затруднено в силу отличия свойств нефтяного и растительного топлива. Различие этих свойств обуславливает особенности работы двигателя на чистом рапсовом масле и его смесях с дизельным топливом. Исследователями этой проблемы отмечается, что показатели рабочего процесса двигателя связаны с особенностями процессов испарения, смесеобразования и сгорания РМ [4, 5].

Известно, что период задержки воспламенения  $\varphi_i (\tau_i)$  в дизеле определяется по индикаторной диаграмме как угол или время от момента начала впрыскивания до момента начала заметного повышения давления, фиксируемого по моменту отрыва кривой нарастания давления при сгорании от кривой давления прокрутки. На данном участке интенсивность процессов стока и выделения теплоты за счет испарения и сгорания примерно одинакова. Процессом теплоотдачи в стенки можно пренебречь. На этом участке также можно пренебречь выгоранием топлива и его влиянием на скорость тепловыделения. При работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на смесях рапсового масла целесообразно ввести несколько упрощающих расчет допущений. Так, для заданных условий следует фиксировать показатель адиабаты сжатия для каждого выбранного состава и на уровне  $n_1=1,36$ .

Температуру  $T_a$  в конце впуска также можно зафиксировать для каждого состава, теплоемкость воздуха  $C_v$  следует принять постоянной для всех режимов работы дизеля.

Тогда скорректированное выражение для расчета периода задержки воспламенения смесей дизельного топлива с рапсовым маслом по нагрузочным и скоростным характеристикам окончательно примет вид:

$$\bar{\varphi}_i = \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{впр}}} = \sqrt{6 \cdot n \cdot 10^{-4}} \left\{ \frac{1 - \Theta_{\text{нв}}}{a} \cdot \Theta_{\text{оп.впр}}^p + 0,085 \cdot \left( 2 + \frac{\varphi_{\text{впр}}}{\Theta_{\text{оп.впр}}} \right) \cdot \frac{\sqrt{a_1 - 1}}{\Psi \cdot \Theta_{\text{оп.впр}}^p} \right\}, \quad (1)$$

где:

$a, a_1$  – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров дизеля и параметров топливоподачи;

$\Psi$  – относительная скорость химических реакций (отношения характеристик выделения и стока теплоты);

$\varphi_{\text{впр}}$  – длительности впрыскивания топлива;

$\Theta_{\text{оп.впр}}$  – угла опережения впрыскивания топлива;

$\Theta_{\text{нв}}$  – безразмерной температуры в момент начала впрыскивания;

$\varphi_i$  – период задержки воспламенения;

$n$  – частота вращения;

$\Theta_{\text{впр}}^p$  – расчетный угол опережения впрыскивания топлива.

На рис. 1 в соответствии с табл. 1 приведена номограмма для определения периода задержки воспламенения при работе дизеля на разных составах топлива. Видно, что с увеличением присутствия рапсового масла в топливе значение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения, увеличивается.

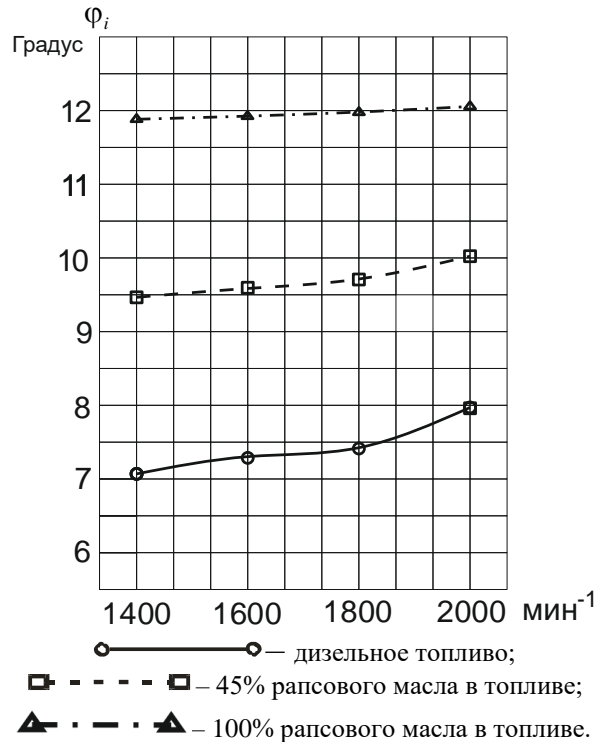
Таблица 1

Данные расчета ПЗВ при работе дизеля с добавками рапсового масла

Состав топлива	Частота вращения мин <sup>-1</sup>	$\alpha$	Значение $\varphi_i$ градус при $\Theta_{\text{оп.впр}}$ (от уст. угла)				
			18	20	22	24	26
100%ДТ	1400	0,8	6,12	6,30	6,52	6,78	7,11
	1600	0,9	6,31	6,48	6,74	6,96	7,32
	1800	1,1	6,53	6,70	6,90	7,14	7,44
	2000	3,5	7,02	7,19	7,41	7,53	7,98
55%ДТ + 45%РМ	1400	0,8	6,64	7,01	7,48	8,18	9,49
	1600	0,9	6,94	7,26	7,73	8,38	9,61
	1800	1,1	7,21	7,52	7,95	8,59	9,71
	2000	3,7	7,64	7,94	8,37	8,93	10,06
100%РМ	1400	1,73	7,25	7,72	8,43	9,58	11,86
	1600	1,74	7,57	8,03	8,71	9,80	11,89
	1800	1,76	7,89	8,34	9,00	10,04	11,98
	2000	4,2	8,25	8,69	9,32	10,32	12,14

При работе дизеля на чистом топливе значения  $\varphi_i$  в рассматриваемом скоростном диапазоне изменяются в пределах от 7,11 до 7,98 градусов пкв. В случае состава, содержащего 45 % РМ, при  $\Theta_{\text{оп.впр.}} = 26^\circ$  до в.м.т. эти же значения  $\varphi_i$  изменяются в пределах от 9,49 до 10,06 градусов пкв. Наконец, при работе дизеля на чистом рапсовом масле значения  $\varphi_i$ , соответствующие периоду задержки воспламенения, составляют, соответственно от 11,86 до 12,14 градусов пкв. Данное обстоятельство может быть объяснено снижением воспламеняемости суммарного топлива, а также уменьшением давления и температуры в цилиндре в момент начала впрыскивания.

Анализ данных расчета ПЗВ в дизеле при его работе на основных скоростных режимах (рис. 1, табл. 1) позволяет рекомендовать предложенные соотношения для предварительной оценки работы дизеля на топливах с добавками рапсового масла.



**Рис. 1. Номограмма для определения ПЗВ при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на топливе с добавками рапсового масла при  $\theta_{уст}=26^\circ$  пкв:**

Рассмотрев особенности изменения параметров фазы быстрого сгорания, можно попытаться провести дальнейший расчет следующих величин:

- максимального давления цикла  $P_z$ ;
- средней скорости нарастания давления  $(dp/d\phi)_{ср}$ .

$P_z$  можно определить в зависимости от количества испарившегося за период задержки воспламенения топлива. Для предварительного расчета можно воспользоваться следующей зависимостью [6]:

$$P_z = P_c + 5,39 \cdot 10^{-4} \cdot m_{v,i} \cdot H_u \cdot (n_1 - 1) / V_c \quad (2)$$

где  $P_c$  – давление в конце сжатия, МПа;

$m_{v,i}$  – количество топлива, испаряющегося за период задержки воспламенения, г;

$H_u$  – теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$n_1$  – показатель политропы;

$V_c$  – объем камеры сжатия, м<sup>3</sup>.

Учитывая, что точное определение  $m_{v,i}$  достаточно проблематично, в расчетах принимаем согласно,  $m_{v,i} \approx (45 \dots 55\%) q_{ц}$ .

Цикловую подачу суммарного топлива можно определить по известной формуле [7]:

$$q_{ц} = 16,6 \cdot \frac{G_T \cdot \tau}{i_c \cdot n} \quad (3)$$

где  $G_T$  – часовой расход топлива, кг/ч;

$n$  – частота вращения, мин<sup>-1</sup>;

$i_c$  – число цилиндров двигателя;

$\tau$  – тактность двигателя.

В то же время полагаем, что количество сгоревшего РМ равно:

$$m_{v,i,PM} = (m_{v,i}/q_{ц}) \cdot (q_{ц,PM}/\alpha), \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в смеси.

Для расчета параметров фазы быстрого горения – максимальной скорости нарастания давления  $(dp/d\varphi)_{\max}$ , угла  $\varphi_z$ , средней скорости нарастания давления  $(\Delta p/d\varphi)_{cp}$  – можно воспользоваться известными зависимостями с учетом характерных особенностей суммарного топлива [8]:

$$\left(\frac{dp}{d\varphi}\right)_{\max} = \frac{6 \cdot n \cdot 10^{-3}}{\left(\sqrt{K_{T,\Sigma}} \cdot d_{20,\Sigma}^{20}\right)} \cdot \frac{P_z \cdot P'}{\varphi_i} \cdot \left(\frac{m_{v,i}}{q_{ц}} \cdot \frac{1 + q_{ц,сн}/(q_{ц} \cdot \alpha)}{1 + q_{ц,сн}/q_{ц}} \cdot \bar{\tau}_i \cdot \frac{100}{ЦЧ_{\Sigma}}\right), \quad (5)$$

где:  $n$  – частота вращения двигателя,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$K_{T,\Sigma}$  – фактор, характеризующий свойства топлива;

$d_{20,\Sigma}^{20}$  – коэффициент, характеризующий отношение плотности РМ к суммарной плотности топлива;

$P'$  – теоретическое давление конца сжатия, МПа;

$\varphi_i$  – период задержки воспламенения в градусах п.к.в.;

$\bar{\tau}_i$  – время, с;

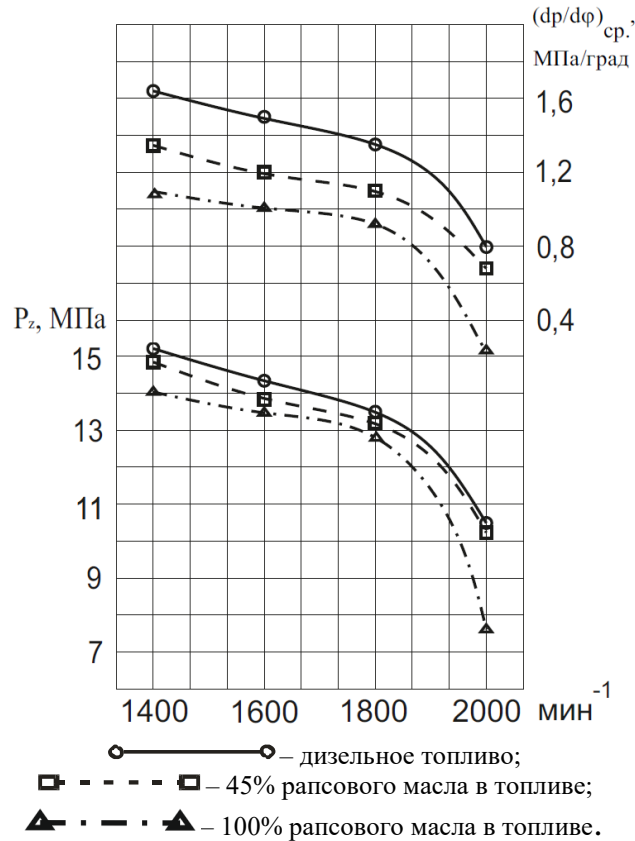
$ЦЧ_{\Sigma}$  – суммарное цетановое число топлива.

$$\left(\frac{\Delta p}{d\varphi}\right)_{cp} = (P_z - P'_c) \cdot (\varphi_z + \Theta_{впр}^p - \varphi_i) \quad (6)$$

Таблица 2

Данные расчета показателей ФБГ при работе дизеля на смеси ДТ с РМ

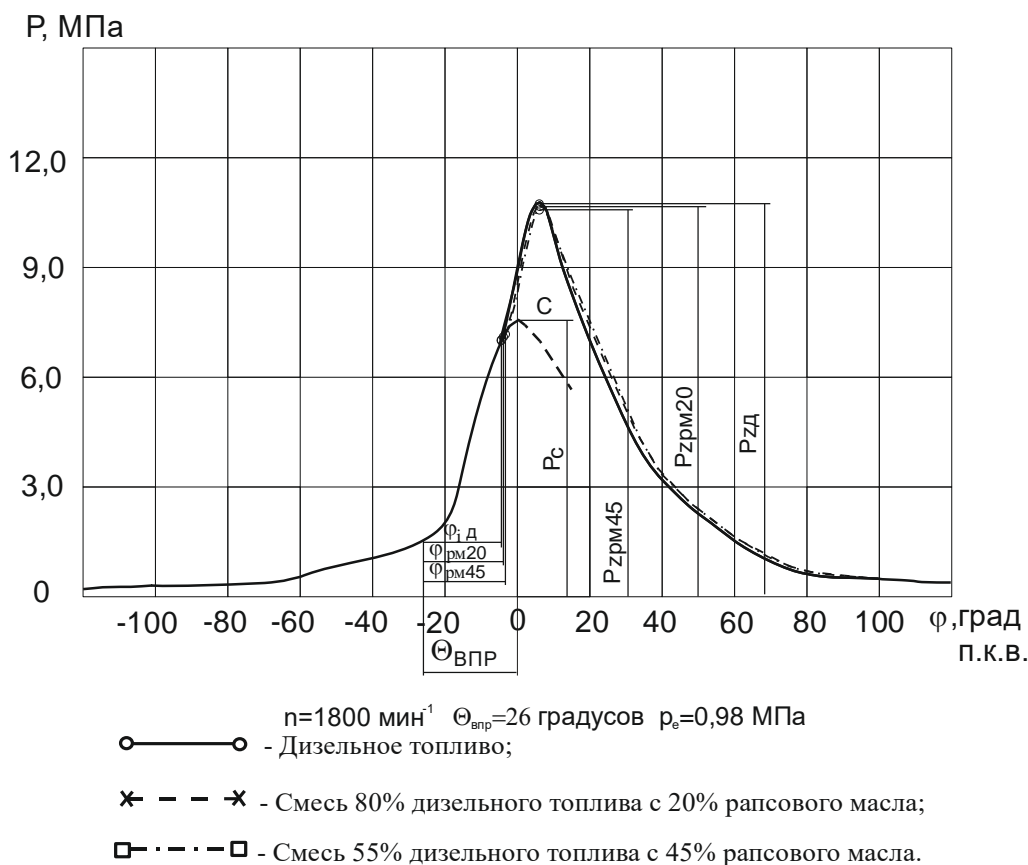
Состав	n, $\text{мин}^{-1}$	$\alpha$	Значение $g_{\text{цикл}}$ и $P_z$ при $\theta_{\text{оп.впр}} = 26^\circ$	
			$P_z$ , МПа	$(dp/d\varphi)_{cp}$ , МПа/град
100%РМ	1400	0,8	14,031	1,075
	1600	0,9	13,441	1,002
	1800	1,1	12,803	0,922
	2000	3,5	7,599	0,207
55%ДТ + 45%РМ	1400	0,8	14,827	1,355
	1600	0,9	13,820	1,205
	1800	1,1	13,203	1,117
	2000	3,7	10,324	0,669
100%ДТ	1400	1,73	15,154	1,641
	1600	1,74	14,256	1,487
	1800	1,76	13,545	1,367
	2000	4,2	10,455	0,805



**Рис. 2. Номограмма для определения показателей ФБГ при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на топливе с добавками рапсового масла при  $\theta_{уст}=26^\circ$  пкв:**

Данные расчетов показывают, что применение смеси ДТ с РМ влияет на параметры фазы быстрого горения. Средняя скорость нарастания давления в цилиндре достигает предельно допустимого по соображениям долговечности дизеля значения при добавке 45% РМ. Таким образом, предложенная номограмма может быть использована для предварительной оценки показателей работы дизеля на топливах с добавками рапсового масла.

На рис. 3 представлена расчетная индикаторная диаграмма работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на чистом ДТ и смесях с содержанием РМ 20 % и 45 % соответственно. Анализируя график (рис. 3) видно, что при увеличении содержания РМ в смеси, кривая сдвигается в сторону поздних углов  $\phi_i$ . Так,  $\phi_i$  ДТ = 20,4 градуса, а значения углов, соответствующих действительному моменту впрыскивания при работе дизеля на СТ равны  $\phi_i$  РМ20 = 21,1 градус и  $\phi_i$  РМ45 = 21,8 градус. Также наблюдается снижение давления  $P_z$  с увеличением концентрации РМ в смеси.



**Рис. 3. Влияние применения СТ на основе РМ на индикаторные диаграммы дизеля 4ЧН 11,0/12,5**

Анализ данных обработки индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ на ЭВМ показал, что работа дизеля на смесевом топливе сопровождается изменением характеристик тепловыделения (рис. 4). Так, при частоте вращения  $1800 \text{ мин}^{-1}$  и работе на чистом ДТ  $T_{\text{max}} = 2820 \text{ К}$ , при работе на СТ с содержанием РМ 20 % и 45 %  $T_{\text{max РМ20}} = 2785 \text{ К}$  и  $T_{\text{max РМ45}} = 2610 \text{ К}$ .

Сравнение кривых выделения теплоты  $\chi$ , активного тепловыделения  $\chi_i$  и динамики использования теплоты позволяет заключить, что сгорание смесевого топлива начинается позже, чем ДТ, и идет медленнее. Это можно объяснить тем, что смесевое топливо имеет меньшее значение ЦЧ, чем ДТ.

В в.м.т. при работе на ДТ доля активного тепловыделения составляет 0,17 от общего количества выделившейся теплоты. При содержании 20 % РМ в топливе  $\chi_i \text{ РМ20} = 0,16$ , а при содержании в 45 % РМ – 0,13. По кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теплоты с увеличением содержания РМ в смеси замедляется, процесс сгорания заканчивается позднее.

Замедление процесса сгорания обуславливает снижение скорости тепловыделения. Если для дизельного процесса  $(d\chi/d\phi)_{\text{max ДТ}} = 0,092$ , то при работе на смеси ДТ и РМ эти значения равны, соответственно,  $(d\chi/d\phi)_{\text{max РМ20}} = 0,089$  и  $(d\chi/d\phi)_{\text{max РМ45}} = 0,085$ . Снижение максимальной скорости тепловыделения обуславливается увеличением периода задержки воспламенения и меньшей скоростью сгорания смесевого топлива.



4. **Гусаков, С.** Особенности применения чистого рапсового масла в качестве топлива в малоразмерных высокооборотных дизелях / С. Гусаков, Пабло Вальехо // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2006. – № 4. – С. 58-62.
5. **Плотников, С.А.** Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла / С.А. Плотников, П.Н. Черемисинов // Общество, наука, инновации (НПК-2017). Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. (Вят. гос. ун-т, 1-29 апреля 2017 г.). Сборник статей. – Киров, 2017. – С. 1875-1882.
6. **Грехов, Л.В.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, В.А. Иващенко, В.А. Марков. – 2-е изд. – М., 2005. – 344 с.
7. **Аднан, И.Ш.** Расчет периода задержки воспламенения в дизеле в условиях двухфазного смесеобразования / И.Ш. Аднан, Г.М. Камфер, В.Н. Луканин // Совершенствование автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. – Москва, 1985. – С. 10-19.

*Дата поступления  
в редакцию: 09.10.2018*

**S.A. Plotnikov<sup>1</sup>, P.N. Cheremisinov<sup>1</sup>, P.I. Bazhan<sup>2</sup>, L.A. Zakharov<sup>2</sup>**

### **INVESTIGATION OF DIESEL COMBUSTION PROCESS BY WORKING ON DIESEL 4CH 11,0/12,5 FUEL WITH RAXED RAPE SEED OIL**

Vyatka state University, Kirov<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev<sup>2</sup>

**Purpose:** The object of the study is the combustion process in diesel when working on diesel 4CHN 11,0/12,5 fuel with the addition of rape seed oil.

**Design/methodology/approach:** The article presents the possibility of using an alternative type of fuel based on rape-seed oil in the power system of a diesel engine.

**Findings:** The results of theoretical calculations of the ignition delay period and the maximum rate of pressure increase are given, and the influence of rapeseed oil on combustion processes is analyzed.

**Research limitations/implications:** The aim of the study was the construction of nomograms for determining the period of ignition delay, the phase of rapid combustion, the indicator diagram and the heat dissipation characteristics of the diesel engine when operating on diesel 4CHN 11,0/12,5 fuel with the addition of rape seed oil.

**Originality/value:** The methods discussed in this paper make it possible to select the rational parameters of special transport-technological means.

*Key words:* diesel fuel, biofuel, rape seed oil, toughness, combustion process, heat release, ignition delay period, fast burning phase.