

## ПОКАЗАТЕЛИ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА НЕФТЯНОМ ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВКАМИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

*В.А. Марков, д.т.н, проф., Бовэнь Са, асп., В.А. Неверов, асп.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
С.Н. Девянин, д.т.н, проф., РГАУ — МСХА им. К.А. Тимирязева  
В.Г. Камалтдинов д.т.н, проф., ЮУрГУ*

Эффективным средством улучшения показателей токсичности отработавших газов дизелей является применение смеси нефтяного топлива с добавками биотоплив из возобновляемого растительного сырья. Приведены результаты экспериментальных исследований дизеля типа Д-245.12 (1СН11/12,5), работающего на смесях нефтяного дизельного топлива с добавками в количестве 10 % по объему растительных масел: рапсового, подсолнечного, соевого, кукурузного, льняного, горчичного, рыжикового. Показано, что при работе на смесевом топливе снижается эмиссия всех нормируемых компонентов с отработавшими газами дизеля. На режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента содержание в отработавших газах оксидов азота снизилось на 0,7–8,3 %, дымности — на 7,5–37,5 %, монооксида углерода — на 3,0–20,0 % и легких несгоревших углеводородов — на 8,3–27,9 %. При испытаниях дизеля на исследуемых смесях снижение эффективного КПД двигателя не превышало 3 %. Проведены расчетные исследования влияния цетанового числа исследуемых смесевых топлив и содержания в их составе кислорода на период задержки воспламенения и выбросы  $\text{NO}_x$  с отработавшими газами.

### Введение

Работа дизелей транспортного и сельскохозяйственного назначения оценивается комплексом эксплуатационно-технических показателей [1, 2]. В настоящее время важнейшими из них являются показатели токсичности отработавших газов (ОГ) [3–5]. Это обусловлено как ухудшением экологической обстановки, так и ужесточением требований, предъявляемых к двигателям внутреннего сгорания современными нормативными документами на токсичность ОГ. К нормируемым токсичным компонентам ОГ дизелей относятся оксиды азота  $\text{NO}_x$ , монооксид углерода  $\text{CO}$ , легкие несгоревшие углеводороды  $\text{C}_n\text{H}_m$ , сажа (углерод  $\text{C}$ ) или твердые частицы [4–6]. К ненормируемым токсичным компонентам ОГ относятся оксиды серы, альдегиды, фенолы и их производ-

ные, кетоны и др. Токсикологическая значимость указанных токсичных веществ неодинакова. В частности, по данным работ [5, 6] токсикологическая значимость  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , твердых частиц и оксидов серы  $\text{SO}_x$  оценивается как отношение 1/41,1/3,16/200/22. Таким образом, основными показателями токсичности ОГ являются выбросы оксидов азота с ОГ и дымность отработавших газов.

К эффективным средствам снижения показателей токсичности ОГ дизельных двигателей относится использование альтернативных топлив [3, 4]. В качестве перспективных альтернативных топлив дизелей используются различные биотоплива. Среди биотоплив, нашедших наибольшее применение в дизелях, следует выделить растительные масла и их производные — метиловый, этиловый и бутиловый эфиры [7–9]. Несмотря на проблемы, возникающие при эксплуатации дизелей на растительных маслах, продолжают исследования их работы на этих биотопливах и их смесях с другими топливами, в основном с нефтяным дизельным топливом (ДТ) [10–15].

Применение растительных масел в качестве самостоятельного топлива затруднено из-за различий физико-химических свойств растительных масел и нефтяного ДТ. Это сопровождается проблемами, возникающими при функционировании дизелей на растительных маслах. К ним относятся плохое качество процессов топливоподачи и распыливания масел, вызванное их высокими вязкостью и плотностью, а также отмечаемые при длительной работе на этих маслах коксование распылителей и деталей, образующих камеру сгорания (КС), нарушение подвижности поршневых колец. В связи с этим представляется целесообразным использовать растительные масла как добавку к нефтяному ДТ [7, 16, 17]. Использование смесей нефтяного ДТ с небольшой добавкой растительных масел позволяют решить указанные проблемы.

При анализе возможностей применения растительных масел в качестве моторных топлив обычно рассматривают рапсовое масло [7–9]. Вме-

сте с тем в России производят и другие виды растительных масел. Целью работы является сравнительный анализ показателей токсичности ОГ дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавками растительных масел, и анализ факторов, влияющих на эти показатели. Эффективность применения смесевых топлив подтверждена экспериментальными данными при работе дизеля типа Д-245.12 (1ЧН11/12,5) на смесях нефтяного ДТ с добавками различных растительных масел в количестве 10 % по объему, представленными в работах [7, 18–22]. В качестве добавки к нефтяному ДТ использовались следующие виды масел: рапсовое, подсолнечное, соевое, кукурузное, льняное, горчичное, рыжиковое.

#### Состав и свойства растительных масел

На состав и физико-химические свойства растительных масел оказывают влияние сорт масличной культуры, условия ее выращивания и технология переработки. В то же время свойства разных растительных масел во многом схожи между собой и зависят от состава и строения жиров, которые определяются видом растения. Основой всех жиров являются полные сложные эфиры глицерина и высших алифатических кислот [7]. В составе сложного эфира одна молекула глицерина  $C_3H_5(OH)_3$  связана с остатками трех жирных кислот (эти соединения называют триацилглицеридами). Массовая доля триацилглицеридов в жирах составляет 93–98 %. Жирнокислотный состав исследуемых растительных масел приведен в табл. 1 [23].

В табл. 2 приведены некоторые физико-химические свойства исследуемых растительных масел и нефтяного ДТ марки Л (летнее) по ГОСТ 305–2013 [24]. Эти данные свидетельствуют о том, что свойства растительных масел заметно

отличаются от свойств нефтяного ДТ. Цетановое число растительного масла, характеризующее его самовоспламеняемость в КС дизеля, несколько ниже, чем у нефтяного ДТ. Растительные масла отличаются от нефтяного ДТ по фракционному составу. Температуры выкипания растительных масел очень высоки (около 280–300 °С против 180–360 °С у нефтяного ДТ). При атмосферном давлении и температуре более 300 °С разогнать его на отдельные фракции не представляется возможным из-за термического разложения масла.

Одной из серьезных проблем использования растительных масел в качестве топлива для дизелей является его высокая (на порядок по сравнению с ДТ) вязкость. Эта характеристика определяет качество распыливания топлива, смесеобразования и последующего сгорания. Теплоотворная способность растительных масел несколько ниже, чем у нефтяного ДТ, поскольку молекулы этих масел содержат значительное количество атомов кислорода (до 12 % по массе, у нефтяного ДТ — не более 0,4 % по массе). В связи с этим удельный эффективный расход растительного масла заметно больше, чем при работе дизеля на нефтяном ДТ.

Вместе с тем содержание в молекулах растительных масел значительного количества кислорода, способствует повышению полноты сгорания, что благоприятно сказывается на улучшении экологических показателей дизеля. К положительным экологическим свойствам растительных масел следует отнести низкое содержание в них серы (0,002 %) и практически полное отсутствие полициклических ароматических углеводородов, являющихся канцерогенами.

Поскольку при работе дизеля использовались не чистые растительные масла, а смесевые био-

Таблица 1

Жирнокислотный состав нерафинированных растительных масел

Растительное масло	Массовая доля, % по массе, жирных кислот растительных масел					
	насыщенных			ненасыщенных		
	Миристиновой $C_{14}H_{28}O_2$ или С 14:0	Пальмитиновой $C_{16}H_{32}O_2$ или С 16:0	Стеариновой $C_{18}H_{36}O_2$ или С 18:0	Олеиновой $C_{18}H_{34}O_2$ или С 18:1	Линолевой $C_{18}H_{32}O_2$ или С 18:2	Линоленовой $C_{18}H_{30}O_2$ или С 18:3
РапМ	0–0,2	1,5–6,0	0,5–3,1	8,0–60,0	11,0–23,0	5,0–13,0
ПМ	0–0,2	5,6–7,6	2,7–6,5	14,0–39,4	18,3–74,0	До 0,3
СМ	0–0,2	8,0–13,5	2,0–5,4	17,0–30,0	48,0–59,0	4,5–11,0
КМ	0–0,3	8,6–16,5	0–3,3	20,0–42,2	34,0–65,6	0–2,0
ЛМ	5,4–11,3	2,5–8,0	0,4–1,0	13,0–36,0	8,3–30,0	30,0–67,0
ГМ	0–1,0	0,5–4,5	0,5–2,0	8,0–23,0	10,0–24,0	6,0–18,0
РыжМ	0–0,2	5,0–7,0	2,0–2,5	12,0–20,0	12,0–20,0	14,0–22,0

**Примечание:** РапМ — рапсовое, ПМ — подсолнечное, СМ — соевое, КМ — кукурузное, ЛМ — льняное, ГМ — горчичное, РыжМ — рыжиковое. После названия жирной кислоты приведены формула состава и условная формула состава, в которой первая цифра соответствует числу атомов углерода, а вторая — числу двойных связей в молекуле.

Свойства исследуемых растительных масел и нефтяного ДТ

Свойство	Вид топлива							
	ДТ	РапМ	ПМ	СМ	КМ	ЛМ	ГМ	РыжМ
Плотность при температуре 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	830	916	923	923	921	912	920	910
Вязкость кинематическая при температуре 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	3,8	75,0	72,0	65,0	66,6	59,0	70,0	57,7
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	37,3	37,4	37,3	37,1	37,6	37,2	37,5
Цетановое число	45	36	37	35	37	38	35	37
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг воздуха/кг масла	14,31	12,52	12,36	12,38	12,38	12,62	12,44	12,52
Содержание, % по массе:								
С	87,0	77,0	77,6	77,5	77,5	77,8	77,1	77,6
Н	12,6	12,0	11,5	11,5	11,5	12,0	11,8	11,8
О	0,4	11,0	10,9	11,0	11,0	10,2	11,1	10,6

топлива с относительно небольшим содержанием растительных масел в смеси с нефтяным ДТ, равным 10 % по объему, то отличия моторных свойств этих смесей от нефтяного ДТ сравнительно невелики. Это позволяет использовать рассматриваемые смесевые топлива в дизеле без изменения его регулировочных параметров.

#### Экспериментальные исследования дизеля на нефтяном дизельном топливе с добавками растительных масел

Сравнительный анализ показателей токсичности ОГ дизеля Д-245.12С (4СН11/12,5), работающего на нефтяном ДТ с добавками растительных масел, выполнялся на основании результатов экспериментальных исследований. Этот двигатель производства Минского моторного завода установлен на различных внедорожных транспортных средствах, в том числе сельскохозяйственного назначения. В этом дизеле, имеющем полуразделенную КС типа ЦНИДИ, организовано объемно-плечное смесеобразование. Топливная система дизеля включает топливный насос высокого давления (ТНВД) фирмы Motorgal типа РР4М10U1f с диаметром плунжеров 10 мм и их полным ходом — 10 мм, топливопроводы высокого давления длиной 540 мм и форсунки типа ФДМ-22, которые были отрегулированы на давление начала впрыскивания 21,0 МПа.

Моторный стенд с дизелем оборудован комплектом измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась оптическим дымомером МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью измерения  $\pm 1$  %. Содержание в ОГ газообразных токсичных компонентов определялось с использованием газоанализатора SAE-7532 японской фирмы Yanaco. Погрешность определения содержания оксидов азота в ОГ составляла  $\pm 10$  ppm (в диапазоне измерения от 1000 до 4000 ppm). Для монооксида углерода СО и несгоревших углеводородов С<sub>Н<sub>x</sub></sub> погрешность измерения составляла соответственно  $\pm 3$  % (в диа-

пазоне от 0 до 1 %) и  $\pm 10$  ppm (в диапазоне от 0 до 200 ppm).

Экспериментальные исследования дизеля выполнялись на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла ЕСЕ R49 Правил 49 ЕЭК ООН (рис. 1) с установочным углом опережения впрыскивания топлива  $\theta = 13^\circ$  поворота коленчатого вала до верхней мертвой точки (ПКВ до ВМТ) и неизменным положением упора дозирующей рейки ТНВД. Основными эксплуатационными режимами цикла ЕСЕ R49 являются режимы максимальной мощности и максимального крутящего момента (режимы № 6 и 8, рис. 1). Доля времени

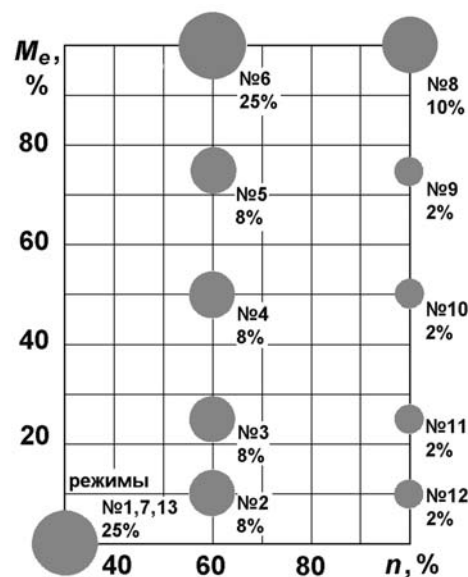


Рис. 1. Стационарный европейский 13-режимный цикл (нормы ЕСЕ R49), используемый для оценки токсичности ОГ дизелей автомобилей средней и большой грузоподъемности с полной массой более 3,5 т:

каждый режим испытательного цикла обозначен кружком с указанием его номера и доли времени в процентах от общего времени эксплуатации;  $n$  — число оборотов двигателя;  $M_e$  — крутящий момент на валу двигателя; параметры  $n$  и  $M_e$  выражены в процентах от их номинальных значений

**Выбросы оксидов азота и дымность ОГ дизеля Д-245.12С  
на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента**

Вид топлива	Показатель дизеля							
	$C_{NOx} N_{max}$ , ppm	$\Delta C_{NOx}$ , %	$C_{NOx} M_{max}$ , ppm	$\Delta C_{NOx}$ , %	$K_X N_{max}$ , % (Н)	$\Delta K_X$ , %	$K_X M_{max}$ , % (Н)	$\Delta K_X$ , %
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с рапсовым маслом								
ДТ	675	—	800	—	11,0	—	25,0	—
90 % ДТ + 10 % РапМ	660	-2,2	785	-1,9	9,5	-13,6	20,5	-18,0
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с подсолнечным маслом								
ДТ	605	—	680	—	14,5	—	20,0	—
90 % ДТ + 10 % ПМ	580	-4,1	675	-0,7	12,0	-17,2	15,0	-25,0
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с соевым маслом								
ДТ	605	—	700	—	16,0	—	43,0	—
90 % ДТ + 10 % СМ	560	-7,4	650	-7,1	10,0	-37,5	31,0	-27,9
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с кукурузным маслом								
ДТ	600	—	650	—	18,0	—	40,0	—
90 % ДТ + 10 % КМ	550	-8,3	620	-4,6	14,0	-22,2	37,0	-7,5
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с льняным маслом								
ДТ	605	—	700	—	16,0	—	43,0	—
90 % ДТ + 10 % ЛМ	570	-5,8	690	-1,4	11,0	-31,3	36,0	-16,3
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с горчичным маслом								
ДТ	550	—	640	—	17,0	—	42,0	—
90 % ДТ + 10 % ГМ	545	-0,9	625	-2,3	12,0	-29,4	36,0	-14,3
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с рыжиковым маслом								
ДТ	550	—	640	—	17,0	—	42,0	—
90 % ДТ + 10 % РыжМ	525	-4,5	620	-3,1	15,0	-11,8	36,0	-14,3

Таблица 4

**Выбросы с ОГ монооксида углерода и несгоревших углеводородов дизеля Д-245.12С  
на режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента**

Вид топлива	Показатель дизеля							
	$C_{CO} N_{max}$ , ppm	$\Delta C_{CO}$ , %	$C_{CO} M_{max}$ , ppm	$\Delta C_{CO}$ , %	$C_{CHx} N_{max}$ , ppm	$\Delta C_{CHx}$ , %	$C_{CHx} M_{max}$ , ppm	$\Delta C_{CHx}$ , %
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с рапсовым маслом								
ДТ	210	—	330	—	150	—	170	—
90 % ДТ + 10 % РапМ	220	-4,8	305	-7,6	120	-20,0	130	-23,5
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с подсолнечным маслом								
ДТ	165	—	315	—	105	—	82	—
90 % ДТ + 10 % ПМ	160	-3,0	270	-14,3	95	-9,5	73	-11,0
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с соевым маслом								
ДТ	102	—	330	—	108	—	170	—
90 % ДТ + 10 % СМ	96	-5,9	285	-13,6	99	-8,3	150	-11,8
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с кукурузным маслом								
ДТ	255	—	470	—	163	—	201	—
90 % ДТ + 10 % КМ	210	-17,6	450	-4,3	120	-24,4	145	-27,9
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с льняным маслом								
ДТ	102	—	330	—	108	—	170	—
90 % ДТ + 10 % ЛМ	85	-16,7	280	-15,2	83	-23,1	130	-23,5
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с горчичным маслом								
ДТ	100	—	300	—	76	—	130	—
90 % ДТ + 10 % ГМ	91	-9,0	275	-8,3	61	-19,1	105	-19,2
Нефтяное ДТ, смесь ДТ с рыжиковым маслом								
ДТ	100	—	300	—	76	—	130	—
90 % ДТ + 10 % РыжМ	80	-20,0	270	-10,0	60	-21,1	116	-10,8

работы дизеля на режиме максимальной мощности составляет 25 %, а на режиме максимального крутящего момента — 10 % от общего времени работы. Результаты испытаний дизеля на указанных режимах приведены в табл. 3 и 4.

Анализ результатов испытаний дизеля Д-245.12С показывает, что добавка 10 % (об.) исследуемых растительных масел в нефтяное ДТ позволило снизить выбросы всех нормируемых токсичных компонентов ОГ. На режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента содержание в ОГ оксидов азота снизилось на 0,7–8,3 %, а дымность ОГ — на 7,5–37,5 % (см. табл. 3). На этих режимах отмечено снижение содержания в ОГ монооксида углерода на 3,0–20,0 % и легких несгоревших углеводородов — на 8,3–27,9 %. При испытаниях дизеля на исследуемых смесях изменения эффективного КПД двигателя не превышали 3 %.

#### Анализ факторов, влияющих на показатели токсичности ОГ дизеля, работающего на нефтяном ДТ с добавками растительных масел

Снижение выбросов оксидов азота связано с меньшим цетановым числом растительных масел (их худшей воспламеняемостью в цилиндрах дизеля) и снижением температур сгорания, а уменьшение дымности ОГ — с наличием атомов кислорода в молекулах растительных масел, что благоприятно сказывается на процессе сгорания (окисления) исследуемых смесевых топлив. Уменьшение выброса монооксида углерода объясняется уменьшением температур сгорания исследуемых смесевых топлив, что приводит к снижению интенсивности реакции диссоциации диоксида углерода  $CO_2$  с образованием монооксида углерода  $CO$  и кислорода  $O_2$ . Сокращение эмиссии легких несгоревших углеводородов вызвано более тяжелым фракционным составом исследуемых смесевых топлив — меньшим содержанием в них легких фракций.

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на показатели токсичности ОГ дизеля, является худшая воспламеняемость рассматриваемых смесевых топлив в КС дизеля (их меньшее цетановое число) и относительно большое содержание атомов кислорода в молекулах исследуемых смесевых топлив. Об этом свидетельствуют данные, приведенные табл. 5.

Для оценки влияния цетанового числа исследуемых смесей нефтяного ДТ с растительными маслами и содержания в их составе атомов кислорода на период задержки воспламенения и выбросы с ОГ наиболее значимых газообразных токсичных компонентов — оксидов азота были проведены расчетные исследования параметров рабочего процесса дизеля Д-245.12С. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса (ПК) ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана и предназначенного для расчетных исследований рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания [25, 26]. ПК ДИЗЕЛЬ-РК прошел проверку на двигателях различной размерности, быстроходности, назначения и обеспечил хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Моделирование рабочего процесса дизеля Д-245.12С проведено на режиме максимальной мощности с  $n = 2400$  об/мин при значении цикловой подачи топлива  $q_{ц} = 80$  мм<sup>3</sup>. При расчетных исследованиях задавался закон подачи, представленный в табл. 6, формируемый кулачками ТНВД на режиме максимальной мощности [7]. Угол начала подъема иглы форсунки составлял 7 град ПКВ до ВМТ.

В табл. 5 представлены результаты расчетных исследований периода задержки воспламенения

Таблица 5

#### Свойства исследуемых нефтяного ДТ и его смесей с растительными маслами и снижение содержания оксидов азота в ОГ при работе на этих смесях

Свойство	Вид топлива							
	ДТ	90 % ДТ + 10 % РапМ	90 % ДТ + 10 % ПМ	90 % ДТ + 10 % СМ	90 % ДТ + 10 % КМ	90 % ДТ + 10 % ЛМ	90 % ДТ + 10 % ГМ	90 % ДТ + 10 % РыжМ
Цетановое число	45,0	44,1	44,2	44,0	44,2	44,3	44,0	44,2
Содержание, % по массе:								
С	87,0	86,0	86,1	85,9	86,0	86,1	86,0	86,1
Н	12,6	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5
О	0,4	1,5	1,4	1,6	1,5	1,4	1,5	1,4
Период задержки воспламенения $\varphi_i$ на режиме максимальной мощности, град ПКВ	3,53	3,71	3,70	3,74	3,73	3,71	3,70	3,72
Снижение содержания $NO_x$ в ОГ на режимах максимальной мощности (числитель) и максимального крутящего момента (знаменатель), %	0/0	2,2/1,9	4,1/0,7	7,4/7,1	8,3/4,6	5,8/1,4	0,9/2,3	4,5/3,1

**Закон подачи топлива дизеля Д-245.12С на режиме с частотой вращения**  
 $n = 2400$  об/мин и цикловой подачей  $q_u = 80$  мм<sup>3</sup>

Угол поворота вала $\phi$ , град ПКВ	Скорость впрыскивания, м <sup>3</sup> /с	Угол поворота вала $\phi$ , град ПКВ	Скорость впрыскивания, м <sup>3</sup> /с	Угол поворота вала $\phi$ , град ПКВ	Скорость впрыскивания, м <sup>3</sup> /с
0	0	6,0	$8,6 \cdot 10^{-5}$	12,0	$8,8 \cdot 10^{-5}$
1,0	$2,2 \cdot 10^{-5}$	7,0	$8,5 \cdot 10^{-5}$	13,0	$8,2 \cdot 10^{-5}$
2,0	$5,6 \cdot 10^{-5}$	8,0	$8,4 \cdot 10^{-5}$	14,0	$6,4 \cdot 10^{-5}$
3,0	$7,6 \cdot 10^{-5}$	9,0	$9,5 \cdot 10^{-5}$	15,0	$4,4 \cdot 10^{-5}$
4,0	$8,0 \cdot 10^{-5}$	10,0	$9,4 \cdot 10^{-5}$	16,0	0
5,0	$8,4 \cdot 10^{-5}$	11,0	$9,2 \cdot 10^{-5}$		

рабочей смеси в дизеле Д-245.12, работающем на указанном режиме. Эти данные свидетельствуют о том, что при переводе двигателя с нефтяного ДТ на его смеси с различными растительными маслами увеличивается период задержки воспламенения  $\phi_i$ . Если при работе исследуемого двигателя на нефтяном ДТ период задержки воспламенения рабочей смеси составил  $\phi_i = 3,53$  град ПКВ, то при работе на смеси 90 % ДТ и 10 % СМ он увеличился до  $\phi_i = 3,74$  град ПКВ. При этом на режиме максимальной мощности содержание оксидов азота в ОГ сократилось на 7,4 %, а на режиме максимального крутящего момента — на 7,1 %. Эта смесь характеризуется наибольшим содержанием кислорода, равным 1,6 % по массе.

#### Заключение

Проведенные исследования подтвердили эффективность использования смесевых биотоплив, содержащих 10 %-ную добавку различных растительных масел, в дизелях транспортного и сельскохозяйственного назначения. Исследованы следующие виды растительных масел: рапсовое, подсолнечное, соевое, кукурузное, льняное, горчиное, рыжиковое. Добавка этих масел в нефтяное ДТ улучшает экологические показатели дизеля, работающего на этих топливах. На режимах максимальной мощности и максимального крутящего момента содержание в ОГ оксидов азота снизилось на 0,7–8,3 %, дымность ОГ — на 7,5–37,5 %, концентрации в ОГ монооксида углерода — на 3,0–20,0 % и легких несгоревших углеводородов — на 8,3–27,9 %. При испытаниях дизеля на исследуемых смесях изменения эффективного КПД двигателя не превышали 3 %. К основным факторам, способствующим улучшению названных показателей, относится содержание в исследуемых биотопливах заметного количества кислорода (до 1,6 % по массе). Другой фактор — увеличение периода задержки воспламенения рабочей смеси. При этом

на режиме максимальной мощности содержание оксидов азота в ОГ сократилось на 7,4 %, а на режиме максимального крутящего момента — на 7,1 %. Это объясняется смещением процесса сгорания на линию расширения с пониженными температурами сгорания.

#### Литература

1. Грехов Л.В. Машиностроение. Энциклопедия. Т. IV. Двигатели внутреннего сгорания / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков и др.; под ред. А.А. Александрова, Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.
2. Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Теория рабочих процессов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др.; под ред. В.Н. Луканина. М.: Высшая школа, 2005. 479 с.
3. Ерохов В.И. Токсичность современных автомобилей: Методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу. М.: Изд-во «Форум», 2017. 448 с.
4. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
5. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. Владимир: Изд-во Владимирского государственного университета, 2000. 256 с.
6. Экологические аспекты применения моторных топлив на транспорте / В.Ф. Кутенев, В.А. Звонов, В.И. Черных и др. // Автомобильные и тракторные двигатели: Межвуз. сб. М.: Изд-во ТУ «МАМИ», 1998. Вып. 14. С. 150–160.
7. Марков В.А., Девянин С.Н., Семенов В.Г., Багров В.В., Зыков С.А. Моторные топлива, производимые из растительных масел; под ред. В.А. Маркова. Рига: Изд-во Lambert Academic Publishing, 2019. 420 с.
8. Лютко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.
9. Васильев И.П. Влияние топлив растительного происхождения на экологические и экономические показатели дизеля. Луганск: Изд-во Восточно-украинского национального университета им. В. Даля, 2009. 240 с.
10. Babu A.K., Devaradjane G. Vegetable Oils and their Derivatives as Fuels for CI Engines: an Overview // SAE Technical Paper Series. 2003. № 2003-01-0767. Pp. 1–18.
11. Spessert B.M., Arendt I., Schelcher A. Influence of RME and Vegetable Oils on Exhaust Gas and Noise Emissions of Small Industrial Diesel Engines // SAE Technical Paper Series. 2004. № 2004-32-0070. Pp. 1–15.

12. *Che Mat S., Idroas M.Y., Hamid M.F., Zainal Z.A.* Performance and Emissions of Straight Vegetable Oils and its Blends as a Fuel in Diesel Engine: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. Pp. 808–823.
13. *Hazar H., Sevinc H.* Investigation of the Effects of Pre-Heated Linseed Oil on Performance and Exhaust Emission at a Coated Diesel Engine // *Renewable Energy*. 2019. Vol. 130. Pp. 961–967.
14. *Плотников С.А., Карташевич А.Н., Черемисинов П.Н.* Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях // *Двигателестроение*. 2017. № 4. С. 21–24.
15. *Ощепков П.П., Бижаев А.В., Заев И.А., Смирнов С.В., Адегбенро Симеон Адедожа.* Исследование дизельного топлива с добавками пальмового масла // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2018. № 5. С. 56–62.
16. *Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А.* Применение в дизелях нетрадиционных топлив, как добавок к основному. М. : Изд-во «Легион-Автодата», 2014. 162 с.
17. *Уханов А.П., Уханов Д.А., Шеменев Д.С.* Дизельное смешевое топливо. Пенза: РИО Пензенской государственной сельскохозяйственной академии, 2012. 147 с.
18. *Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Loboda S.S.* Optimization of diesel fuel and corn oil mixtures composition // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. Pp. 225–234.
19. *Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Savastenko A.A.* Petroleum Diesel Fuel and Linseed Oil Mixtures as Engine Fuels // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 944 (1). Art. № 012077.
20. *Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Savastenko A.A.* Utilization of Variable Consumption Biofuel in Diesel Engine // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 944 (1). Art. № 012076.
21. *Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Loboda S.S.* Biofuel Mixture Composition and Parameters of Exhaust Gases Toxicity // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Issue 2. Art. № 022068.
22. *Markov V.A., Kamaltdinov V.G., Loboda S.S.* Biofuel Mixture Composition and Parameters of Exhaust Gases Toxicity // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 327. Issue 2. Art. № 022068.
23. Кодекс Алиментариус (лат. «Продовольственный кодекс»). Жиры, масла и производные продукты: Пер. с англ. М. : Изд-во «Весь мир», 2007. 68 с.
24. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2014. 15 с.
25. *Kuleshov A.S.* Model for Predicting Air-Fuel Mixing, Combustion and Emissions in DI Diesel Engines over Whole Operating Range // *SAE Technical Paper Series*. 2005. № 2005-01-2119. Pp. 1–10.
26. *Kuleshov A.S.* Multi-Zone DI Diesel Spray Combustion Model and its Application for Matching the Injector Design with Piston Bowl Shape // *SAE Technical Paper Series*. 2007. № 2007-01-1908. Pp. 1–10.