

Санкт-Петербург

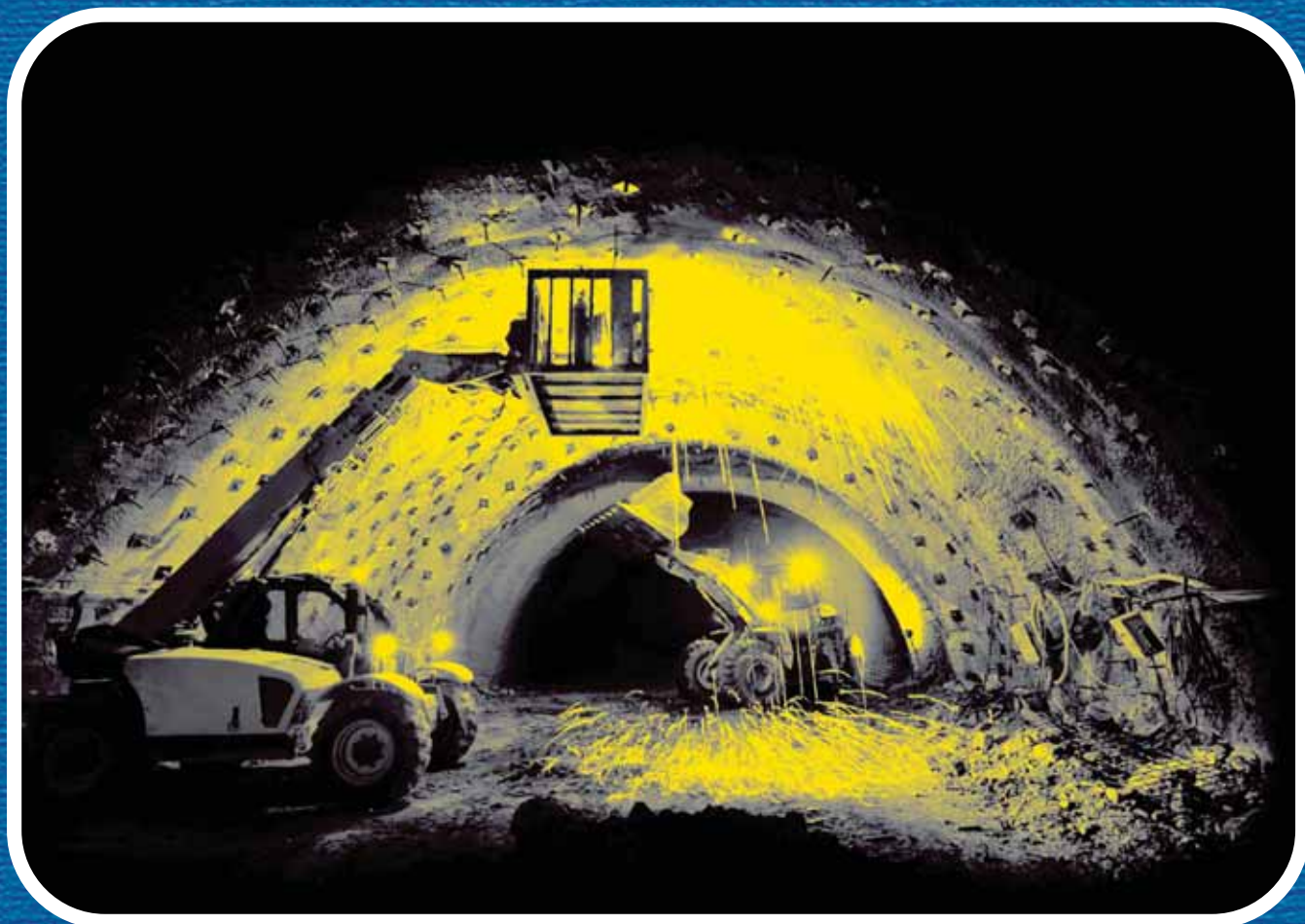
Индекс 70259

ISSN 0202-1633

# ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

1 (283) январь–март 2021

DVIGATELESTROYENIYE







## РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Марков В.А., Кулешов А.С., Неверов В.А.  
Бовэнь Са, Зенкин А.Н.*

**3** Совершенствование процессов  
распыливания и смесеобразования  
при работе дизеля на смесевых биотопливах

*Иванов В.В., Шабалин Д.В., Проговоров А.П.*

**13** Математическая модель расчета  
внутрицилиндровых процессов дизельного двигателя  
с учетом температуры охлаждающей жидкости

*Кочев Н.С., Плотников Л.В., Григорьев Н.И.*

**20** Совершенствование процесса топливоподачи  
тепловозного дизеля 8ЧН21/21,  
работающего по циклу Миллера

## ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Путинцев С.В., Чирский С.П., Стрельникова С.С.*

**26** Влияние вязкости минерального моторного масла  
и присутствие в нем антифрикционной присадки  
на механические потери малоразмерного дизеля

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Алиев С.А., Салатова Д.А., Гаджиев А.В.*

**32** Улучшение пусковых качеств  
тракторного дизеля на основе применения  
обратимой электрической машины

## НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

**37** Двигатели, работающие на метаноле  
(по материалам конгресса CIMAC)

**49** Стандарты EPA США  
по ограничению вредных выбросов судовых дизелей  
(по материалам Power Sourcing Guide 2020–2021)

## ИНФОРМАЦИЯ

Рефераты статей

## ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

*Markov V.A., Kuleshov A.S., Neverov V.A.,  
Sa Boven, Zenkin A.N.*

**3** Improvement of fuel atomization  
and mixing processes  
in engines firing mixed biofuels

*Ivanov V.V., Shabalin D.V. and Progovorov A.P.*  
**13** Simulation of in-cylinder heat exchange processes  
taking account of coolant temperature

*Kochev N.S., Plotnikov L.V. and Grigoryev N.I.*  
**20** Improvement of fuel injection characteristics  
of type 8CHN21/21 locomotive engine  
featuring Miller cycle

## FUEL AND LUBRICANTS

*Putintsev S.V., Chirsky S.P. and Strelnikova S.S.*

**26** Influence of mineral oil viscosity  
and anti-friction additive therein  
on mechanical losses in a small diesel engine

## MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES

*Aliiev S.A., Salatova D.A. and Gajiev A.V.*

**32** Reversible electrical machine as a means  
to improve start performance  
of a tractor diesel engine

## ENGINE BUILDING NEWS

**37** Methanol as engine fuel  
(based on CIMAC papers)

**49** US EPA Exhaust Emission Standards  
for Marine Diesel Engines  
(based on Power Sourcing Guide 2020–2021)

## INFORMATION

**55** Synopsis

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

## ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Н. Кострыгин	<i>гл. конструктор</i>	<i>ООО ИЦД ТМХ, г. Коломна</i>
В.А. Шелеметьев	<i>зам. техн. директора</i>	<i>АО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
С.В. Хильченко	<i>техн. директор</i>	<i>ООО «Морские пропульсивные системы», Санкт-Петербург</i>
А.К. Лимонов	<i>зам. гл. конструктора</i>	<i>ООО «Энергомаш», г. Щекино, Тульская обл.</i>
Е.И. Бирюков	<i>гл. конструктор</i>	<i>АО «Барнаултрансмаши», г. Барнаул</i>
А.В. Попов	<i>зам. ген. директора</i>	<i>АО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
А.С. Куликов	<i>гл. констр. по двиг.</i>	<i>ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>ООО МПЦ «Марине», Санкт-Петербург</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО «ЧТЗ-Уралтрак», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

## НИИ

В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>И ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>рук. науч. направления</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенок	<i>президент</i>	<i>НПХЦ «Миакрон-Нортон», Санкт-Петербург</i>

## ВУЗЫ

В.А. Марков	<i>зав. кафедрой Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
В.А. Рыжов	<i>проф. кафедры ТМС и САПР</i>	<i>КИ фил. МПУ, г. Коломна</i>
Ю.В. Галышев	<i>проф. ВШ энерг. маш.</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
М.И. Куколев	<i>проф. ВШ гидротех. стр-ва</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
О.К. Безюков	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
С.П. Столяров	<i>зав. кафедрой СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>проф. кафедры ТД</i>	<i>БГТУ, г. Брянск</i>
А.В. Разуваев	<i>проф. кафедры ЯЭ</i>	<i>БИТИ фил. ФГАОУ МИФИ, г. Балаково</i>

---

Издатель журнала — ООО «НПФ «Экология», Санкт-Петербург

Журнал «Двигателестроение» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Дата включения в обновленный перечень ВАК — 29.05.2017.

### Группы научных специальностей:

05.02.00 — Машиностроение и машиноведение

05.04.00 — Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

05.14.00 — Энергетика

Электронные версии журнала (2005–2021 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

---

Выпускающий редактор — Н.А. Вольская  
Редактор инф. отдела — Г.В. Мельник  
Ст. редактор — О.Д. Камнева  
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 02.03.2021  
Подписано в печать 23.03.2021  
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7  
Зак. 36. Тираж 700 экз.  
Цена договорная

---

Почтовый адрес редакции журнала:  
ООО «НПФ «Экология», 190020, Санкт-Петербург, а/я 9

Тел.: +7 (921) 956-31-94  
+7 (812) 719-73-30

E-mail: [ecology@rdiesel.ru](mailto:ecology@rdiesel.ru)  
[www.rdiesel.ru](http://www.rdiesel.ru)

---

**ДВИГАТЕЛЕ  
СТРОЕНИЕ**

Типография «Светлица»  
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,  
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2021. № 1 (283)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛИВАНИЯ И СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАБОТЕ ДИЗЕЛЯ НА СМЕСЕВЫХ БИОТОПЛИВАХ

*В.А. Марков, д.т.н., проф., А.С. Кулешов, д.т.н., проф.,  
В.А. Неверов, асп., Са Бовэнь, асп., А.Н. Зенкин, студент  
МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Перспективными альтернативными топливами для дизелей являются биотоплива, получаемые с использованием растительных масел, отличающиеся от нефтяного дизельного топлива повышенными плотностью, вязкостью, поверхностным натяжением и пониженной сжимаемостью. При адаптации дизелей к работе на этих топливах возникает проблема ухудшения качества процессов распыливания топлива и смесеобразования. Проведены расчетные исследования процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля типа Д-245.12С на смесях нефтяного дизельного топлива и рапсового масла. Расчеты подтвердили приемлемое качество процессов распыливания топлива и смесеобразования и возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов дизеля при использовании в качестве топлива указанных смесей. В связи с возможностью закоксовывания распыливающих отверстий форсунок и отложения нагара на деталях камеры сгорания рекомендована работа дизеля не на чистых растительных маслах, а на нефтяном дизельном топливе с небольшой добавкой рапсового масла в количестве до 10 % по объему.

### Введение

Одним из ключевых направлений совершенствования двигателей внутреннего сгорания является их адаптация к работе на альтернативных топливах [1–3], к которым относятся биотоплива, получаемые из возобновляемых сырьевых ресурсов. Среди биотоплив, нашедших наибольшее применение в дизелях, выделяют растительные масла и их производные — сложные эфиры [1, 3, 4]. 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) [5–8].

Применение растительных масел в качестве самостоятельного топлива затруднено из-за различий физико-химических свойств растительных масел и нефтяного ДТ [9, 10]. Это сопровождается

проблемами, возникающими при адаптации дизелей к работе на растительных маслах. Одна из этих проблем — невысокое качество процессов топливоподачи, распыливания масел и смесеобразование, вызванное их утяжеленным фракционным составом [4, 11]. В связи с этим растительные масла часто используются как добавка к нефтяному ДТ. Другое направление адаптации дизеля к работе на растительных маслах — совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования. При этом необходимо обеспечить согласование длины струй распыливаемого топлива с формой камеры сгорания (КС), равномерное распределение топлива по объему КС, требуемые показатели мелкости распыливания топлива. Поэтому необходимы учет свойств растительных масел и адаптация систем топливоподачи дизелей к работе на этих топливах.

### Физико-химические свойства растительных масел и их смесей с нефтяным дизельным топливом

Свойства различных растительных масел во многом схожи между собой и зависят от состава и строения жиров, которые определяются видом масличного растения. Основой всех жиров являются полные сложные эфиры глицерина и высших алифатических кислот [4, 10, 12]. В составе сложного эфира растительного масла одна молекула глицерина  $C_3H_5(OH)_3$  связана с остатками трех жирных кислот, поэтому эти соединения называют триацилглицеридами. Массовая доля триацилглицеридов в жирах составляет 93–98 %. Растительные масла содержат, в основном, жирные кислоты с четным числом атомов углерода ( $C_{14}$ ,  $C_{16}$ ,  $C_{18}$  и др.). При этом в состав масел входят как ненасыщенные (олеиновая, линолевая, линоленовая и др.), так и насыщенные (миристиновая, пальмитиновая, стеариновая и др.) жирные кислоты. В насыщенных жирных кислотах молекулы не имеют двойных связей, а в ненасыщенных присутствуют от одной до трех двойных связей. Жирнокислотный состав масел основных масличных культур России приведен в табл. 1 [12].

При анализе возможностей применения различных растительных масел для производства биотоплив обычно рассматривают рапсовое масло

## 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 C 14:0	Пальмитиновой $C_{16}H_{32}O_2$ или C 16:0	Стеариновой $C_{18}H_{36}O_2$ или C 18:0	Олеиновой $C_{18}H_{34}O_2$ или C 18:1	Линолевой $C_{18}H_{32}O_2$ или C 18:2	Линоленовой $C_{18}H_{30}O_2$ или C 18:3
Рапсовое	0–0,2	1,5–6,0	0,5–3,1	8,0–60,0	11,0–23,0	5,0–13,0
Подсолнечное	0–0,2	5,6–7,6	2,7–6,5	14,0–39,4	18,3–74,0	До 0,3
Соевое	0–0,2	8,0–13,5	2,0–5,4	17,0–30,0	48,0–59,0	4,5–11,0

*Примечание.* 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.

(PM) [1, 3, 4]. Вместе с тем в России выращивают и другие виды масличных культур. Доля подсолнечного масла в общем объеме производства масел в России составляет 86, 84 %, соевого — 7,96 %, рапсового — 4,84 % [13]. Физико-химические свойства смесей нефтяного ДТ марки Л (летнее) по ГОСТ 305–2013 и PM представлены в табл. 2 и 3 [4, 14]. Эти данные свидетельствуют

о том, что приближение свойств этих смесей к свойствам нефтяного ДТ возможно при небольших добавках PM (см. табл. 3).

Необходимо отметить, что повышенные плотность, вязкость, поверхностное натяжение растительных масел, их пониженная сжимаемость приводит к трансформации процессов топливоподачи, впрыскивания и распыливания топлива,

Таблица 2

## Физико-химические свойства смесей нефтяного ДТ и рапсового масла

Физико-химические свойства	Вид топлива					
	ДТ	80 % ДТ + 20 % PM	60 % ДТ + 40 % PM	40 % ДТ + 60 % PM	20 % ДТ + 80 % PM	PM
Молекулярная масса, кг/моль	223,5	355,4	487,3	619,2	751,1	883,0
Плотность при 50 °С, кг/м <sup>3</sup>	811	827	843	859	875	891
Вязкость кинематическая при 50 °С, сСт (мм <sup>2</sup> /с)	2,1	4,7	8,2	13,4	19,6	29,6
Вязкость динамическая при 50 °С, сПз (мПа/с) / Па/с	1,7 /0,0017	3,9 /0,0039	6,9 /0,0069	11,5 /0,0115	17,2 /0,0172	26,4 /0,0264
Коэффициент поверхностного натяжения при 50 °С, мН/м / Н/м	25,3 /0,0253	26,6 /0,0266	27,9 /0,0279	29,2 /0,0292	30,5 /0,0305	31,8 /0,0318
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,5	41,5	40,5	39,5	38,5	37,5
Цетановое число	46	44	42	40	38	36
Условная энергия активации предпламенных реакций, кДж/моль	22,0	22,4	22,8	23,2	23,6	24,0
Удельная теплота парообразования, кДж/кг	250	260	270	280	290	300
Температура топлива, К	380	380	380	380	380	380
Теплоемкость топлива при температуре форсунки, Дж/(кг·К)	1850	1830	1810	1790	1770	1750
Коэффициент диффузии паров топлива при атмосферных условиях, с	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Давление насыщенных паров при температуре 480 К/710 К, бар	0,0475 /1,616	0,0380 /1,297	0,0285 /0,978	0,0190 /0,659	0,0095 /0,340	0 /0,021
Содержание, абс. масс. Доли:						
С	0,870	0,850	0,830	0,810	0,790	0,770
Н	0,126	0,125	0,124	0,123	0,122	0,121
О	0,004	0,025	0,046	0,067	0,088	0,109
Общее содержание серы, % по массе	0,200	0,160	0,120	0,080	0,040	0,002

*Примечание.* дизельное топливо марки Л по ГОСТ 305–2013 (формула состава  $C_{16,2}H_{28,5}$ ), рапсовое масло низкоэруковое (формула состава  $C_{57,0}H_{101,6}O_6$ ).

Физико-химические свойства нефтяного ДТ с добавками рапсового масла

Физико-химические свойства	Вид топлива				
	ДТ	97,5 % ДТ + 2,5 % РМ	95,0 % ДТ + 5,0 % РМ	97,5 % ДТ + 7,5 % РМ	90,0 % ДТ + 10,0 % РМ
Молекулярная масса, кг/моль	223,5	240,0	256,5	273,0	289,5
Плотность при 50 °С, кг/м <sup>3</sup>	811	813	815	817	819
Вязкость кинематическая при 50 °С, сСт (мм <sup>2</sup> /с)	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0
Вязкость динамическая при 50 °С, сПз (мПа/с) / Па/с	1,70 /0,00170	1,87 /0,00187	2,04 /0,00204	2,21 /0,00221	2,46 /0,00246
Коэффициент поверхностного натяжения при 50 °С, мН/м / Н/м	25,3 /0,0253	25,46 /0,02546	25,62 /0,02562	25,78 /0,02578	25,94 /0,02594
Теплота сгорания низшая, МДж/кг	42,500	42,375	42,250	42,125	42,000
Цетановое число	46,00	45,75	45,50	45,25	45,00
Условная энергия активации предпламенных реакций, кДж/моль	22,00	22,05	22,10	22,15	22,20
Удельная теплота парообразования, кДж/кг	250	251	252	253	254
Температура топлива, К	380	380	380	380	380
Теплоемкость топлива при температуре форсунки, Дж/(кг·К)	1850,0	1847,5	1845,0	1842,5	1840,0
Коэффициент диффузии паров топлива при атмосферных условиях, с	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Давление насыщенных паров при температуре 480 К / 710 К, бар	0,0475 /1,616	0,0470 /1,562	0,0465 /1,541	0,0455 /1,515	0,0445 /1,483
Содержание, абс. масс. Доли:					
С	0,870	0,867	0,865	0,863	0,860
Н	0,126	0,126	0,125	0,125	0,125
О	0,004	0,007	0,010	0,012	0,015
Общее содержание серы, % по массе	0,200	0,195	0,190	0,185	0,180

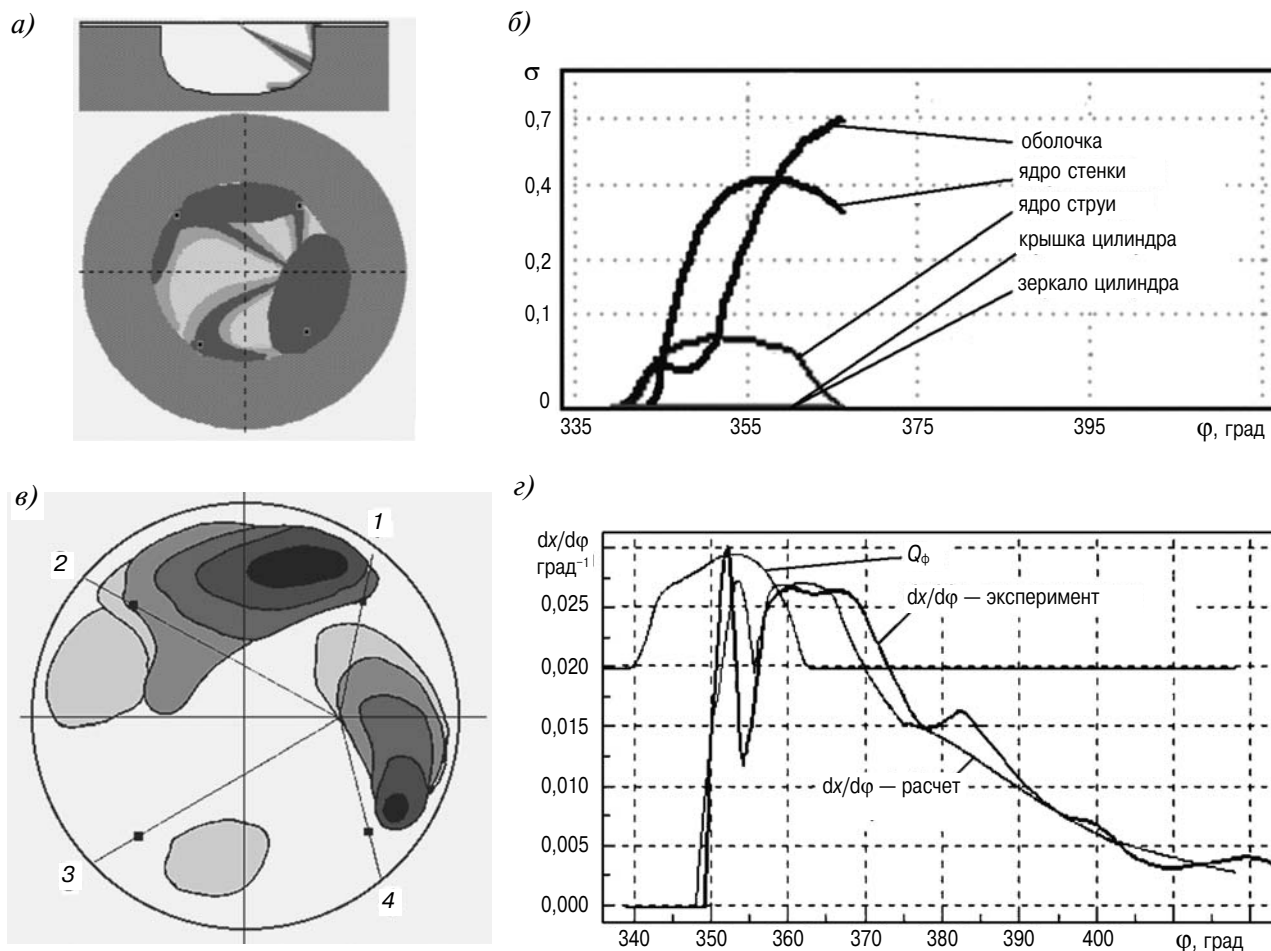
образования рабочей смеси. Из-за указанных отличий свойств нефтяного дизельного топлива и растительных масел при работе дизеля на чистых растительных маслах увеличивается средний диаметр капель топлива (растительного масла), уменьшается угол раскрытия топливных струй, увеличивается их дальноточность, структура струи топлива в поперечном сечении становится более неравномерной, возрастает доля пленочного смесеобразования [4]. Один из путей совершенствования процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на этих биотопливах — использование в качестве топлива не чистых растительных масел, а их смесей с нефтяным ДТ. Другое направление улучшения качества рабочего процесса дизеля, работающего на растительных маслах и топливах на их основе, — исследование и совершенствование процессов распыливания топлива и смесеобразования. Эти процессы в значительной степени определяют эффективность сгорания топлива, топливно-экономические и экологические показатели дизеля [15–17].

Целями работы являются исследование процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах на основе растительных масел и оценка их влияния на показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля. В представленной статье это исследование проведено расчетным путем с использованием программного комплекса (ПК) ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

#### Программный комплекс ДИЗЕЛЬ-РК для расчетных исследований рабочих процессов дизеля

Для моделирования рабочего процесса дизеля, работающего на нефтяном ДТ и биотопливах на основе растительных масел, использован ПК ДИЗЕЛЬ-РК, предназначенный для расчетных исследований рабочих процессов широкого класса двигателей [16, 18]. ПК ДИЗЕЛЬ-РК прошел проверку на двигателях разной размерности, быстроходности и назначения и показал хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. В частности, некоторые результаты исследований дизеля типа СМД-60 (6ЧН13/11,5),





**Рис. 1. Результаты экспериментальных и расчетных исследований движения топливных струй и пристеночных потоков дизеля типа СМД-60:**

*a* – расчет; *b* – экспериментальная кинограмма; *в* – расчет распределения впрыснутого топлива по характерным зонам струи № 1; *г* – скорость тепловыделения  $dx/d\varphi$  и скорость впрыскивания  $Q_\varphi$ , 1–4 номера струй

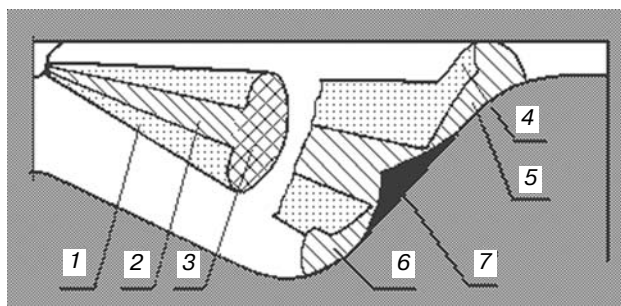
проведенных с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК, представлены на рис. 1 [16].

Для расчета смесеобразования и сгорания в дизелях используется РК-модель, в основе которой лежит расчетный метод, предложенный в начале 90-х годов профессором Н.Ф. Разлейцевым и в дальнейшем доработанный профессором А.С. Кулешовым. РК-модель учитывает особенности характеристики впрыска, включая многофазный впрыск, мелкость распыливания топлива, ориентацию струй в объеме КС, динамику развития топливных струй, взаимодействие струй с воздушным вихрем и стенками. Учитываются условия развития каждой топливной струи и образованных струями пристеночных потоков, а также их взаимодействие между собой. По своей идеологии РК-модель близка к модели, разработанной проф. Хироюсу, хотя имеет существенные отличия, связанные, главным образом, с более детальным рассмотрением взаимодействия топливных струй со стенками и между собой.

При расчете процесса распыливания топлива и смесеобразования выделяются два участка развития струи: начальный участок пульсирующего порционного развития и основной участок кумулятивного развития. В процессе движения струи рассчитываются доли топлива, попавшего в характерные зоны с разными условиями испарения и горения, включая пристеночные зоны на стенке КС, на гребне поршня, на зеркале и крышке цилиндра (рис. 2) [16]. Траектории движения свободных струй, а также движение образованных ими пристеночных потоков рассчитываются с учетом переносного воздействия тангенциального вихря, задаваемого вихревым числом  $H$ , а также с учетом величины углов встречи свободных струй со стенками КС.

В период топливоподачи и развития топливных струй скорость сгорания лимитируется главным образом скоростью испарения топлива. В свободно развивающейся струе зонами интенсивного теплообмена и испарения распыленного топли-





**Рис. 2. Расчетная схема струи топлива:**

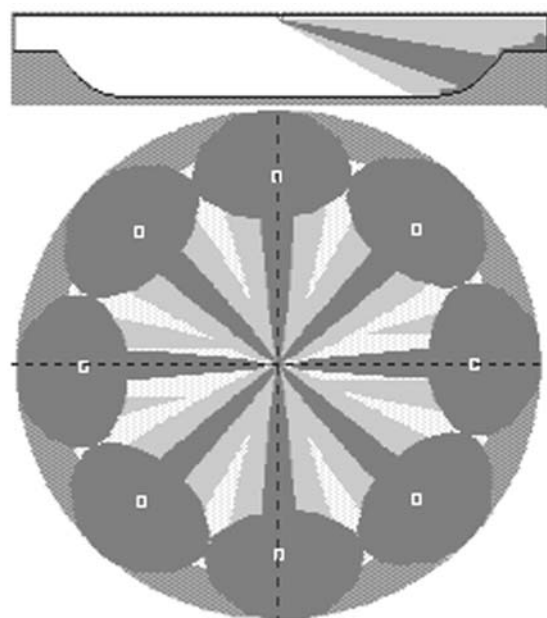
1 — разреженная оболочка струи; 2 — уплотненное осевое ядро; 3 — уплотненный передний фронт; 4 — разреженная оболочка пристеночного потока; 5 — уплотненное ядро пристеночного потока; 6 — передний фронт пристеночного потока; 7 — конусообразное осевое ядро пристеночного потока

ва являются передний фронт и оболочка струи (рис. 3) [16]. В высокоскоростном и плотном осевом потоке прогрев и испарение капель незначительны. При набегании струи на стенку КС скорость испарения топлива, скопившегося в переднем фронте, резко снижается до минимума в момент завершения укладки фронта на стенку. Это вызвано более низкой по сравнению с газовым зарядом температурой стенки, уменьшением обдува капель, уплотнением капельно-газовой смеси на стенке, слиянием и перемешиванием авангардных капель с подлетающими к стенке КС более холодными каплями. После укладки фронта на стенку КС двухфазная смесь начинает расте-

каться по стенке за пределы конуса струи. Скорость испарения топлива в пристеночной зоне увеличивается, хотя и остается меньшей, чем в объеме КС. При растекании по гребню поршня часть топлива может проникнуть в надпоршневой зазор, попасть на крышку и стенки цилиндра. Скорость испарения топлива, поступившего в каждую из названных зон интенсивного теплообмена, равна сумме скоростей испарения отдельных капель. Испарение каждой капли до и после воспламенения топлива подчиняется закону испарения Срезневского. При расчете испарения топлива определялся средний диаметр капель по Заутеру  $d_{32}$ .

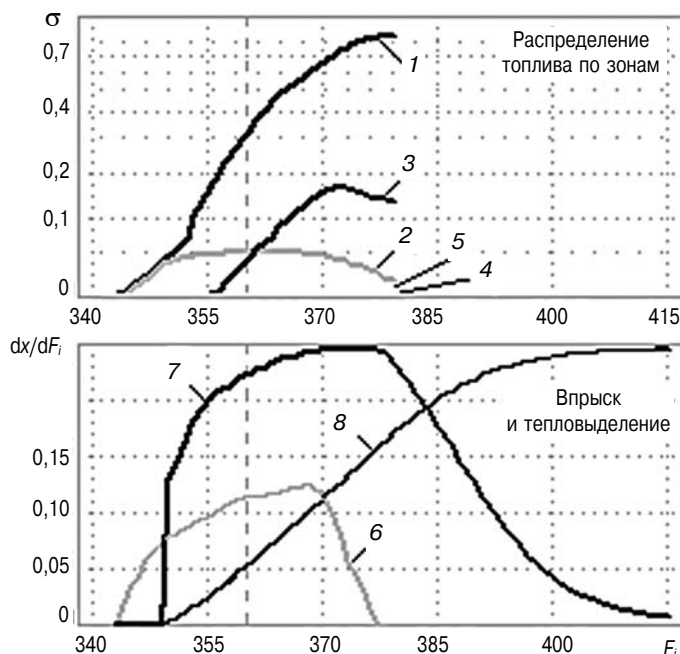
Для расчета скорости испарения определялись константы испарения топлива в различных зонах струи. Оценка констант производилась с учетом ряда параметров, среди которых критерий Нуссельта для процессов диффузии; коэффициент диффузии паров топлива, отнесенный к градиенту парциальных давлений; давление насыщенных паров; плотность жидкого топлива; характерные давления и температуры, в том числе температуры стенок КС, на которые попало топливо.

В расчетной модели тепловыделения выделены четыре периода, отличающиеся физико-химическими особенностями и факторами, лимитирующими скорость процесса: период задержки воспламенения, период начальной вспышки, период управляемого сгорания на участке топливоподачи после вспышки, период диффузионного



**Рис. 3. Визуализация смесеобразования и сгорания в КС дизеля:**

1–5 — распределение топлива по зонам струи; 6–8 — характеристики впрыскивания и тепловыделения по углу поворота коленчатого вала; 1 — разреженная оболочка струи и пристеночного потока; 2 — ядро свободной струи; 3 — ядро пристеночного потока; 4 — топливо, осевшее на крышке цилиндра; 5 — топливо, попавшее на зеркало цилиндра; 6 — характеристика впрыскивания (закон подачи  $dq/d\varphi$ ); 7 — характеристика тепловыделения  $dx/d\varphi$ ; 8 — интегральная характеристика тепловыделения



горения после окончания топливоподачи. По окончании периода задержки воспламенения (ПЗВ) происходит взрывное распространение пламени по активированной смеси в оболочке струи. Первый максимум скорости тепловыделения зависит, в основном, от доли цикловой порции топлива, испарившейся за ПЗВ, степени активации паров, скорости испарения топлива в период вспышки, т. е. от массы впрыснутого топлива, качества его распыливания и макрораспределения, времени испарения, физико-химических, термо- и газодинамических характеристик горючей смеси.

После начальной вспышки и выгорания паров топлива, образовавшихся за ПЗВ, скорость тепловыделения определяется, в основном, скоростью испарения топлива и скоростью догорания продуктов неполного сгорания в объеме цилиндра, которая зависит от средней концентрации неиспользованного кислорода (см. рис. 3). В период диффузионного горения, после окончания впрыска и завершения развития струй, происходит сначала резкое, а затем замедленное снижение скорости сгорания. Это связано с уменьшением массы невыгоревшего топлива и с лимитирующей ролью процесса диффузии в этот период, пламя распадается на множество очагов вокруг локальных скоплений топлива в ядрах струй. Если значительная часть топлива распределяется на стенках камеры в поршне, особенно на стенках вблизи крышки цилиндра, то в интервале 15–30 град по-

ворота коленчатого вала (ПКВ) после верхней мертвой точки (ВМТ) на характеристиках тепловыделения наблюдается еще один небольшой пик. Это связано с возмущением и разрушением квазиламинарного пристеночного слоя при резком удлинении газового столба над соответствующей поверхностью.

ПК ДИЗЕЛЬ-РК включает подпрограмму расчета образования оксидов азота в цилиндре ДВС, основанную на термическом механизме на основе схемы академика Я.Б. Зельдовича, и подпрограмму расчета эмиссии сажи, основанную на методике профессора Н.Ф. Разлейцева [18]. Представленное описание ПК ДИЗЕЛЬ-РК и примеры расчета показателей быстроходных дизелей подтверждают возможность его использования для моделирования рабочего процесса дизеля, работающего на исследуемых смесевых биотопливах.

#### Расчетные исследования процессов распыливания топлива и смесеобразования при работе дизеля на смесевых биотопливах

В качестве объекта расчетных исследований выбран дизель типа Д-245.12С (4ЧН11/12,5) производства Минского моторного завода. Этот двигатель устанавливался на малотоннажные грузовые автомобили ЗиЛ-5301 «Бычок», а его модификации — на автобусы Павловского автомобильного завода (ПАЗ) и тракторы «Беларусь» Минского тракторного завода (МТЗ). Техническая характеристика исследуемого дизеля приведена в табл. 4.

Таблица 4

Техническая характеристика дизеля Д-245.12С (4ЧН11/12,5)

Параметры	Значение
Тип двигателя	Четырехтактный, рядный, дизельный
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра $D$ , мм	110
Ход поршня $S$ , мм	125
Общий рабочий объем $iV_h$ , л	4,32
Степень сжатия $\epsilon$	16,0
Система турбонадува	Турбокомпрессор ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов
Тип камеры сгорания, способ смесеобразования	Камера сгорания типа ЦНИДИ, объемно-плёночное смесеобразование
Номинальная частота вращения $n$ , об/мин	2400
Номинальная мощность $P_e$ , кВт	80
Механизм газораспределения	Клапанного типа с верхним расположением клапанов
Система охлаждения	Водяная, принудительная
Система смазки	Принудительная, с разбрызгиванием
Насос масляный	Шестеренчатый
Система питания	Разделенного типа
Топливный насос высокого давления (ТНВД)	Рядный типа PP4M10U1f фирмы Motorpal с всережимным центробежным регулятором
Длина нагнетательных топливопроводов $L_t$ , мм	540

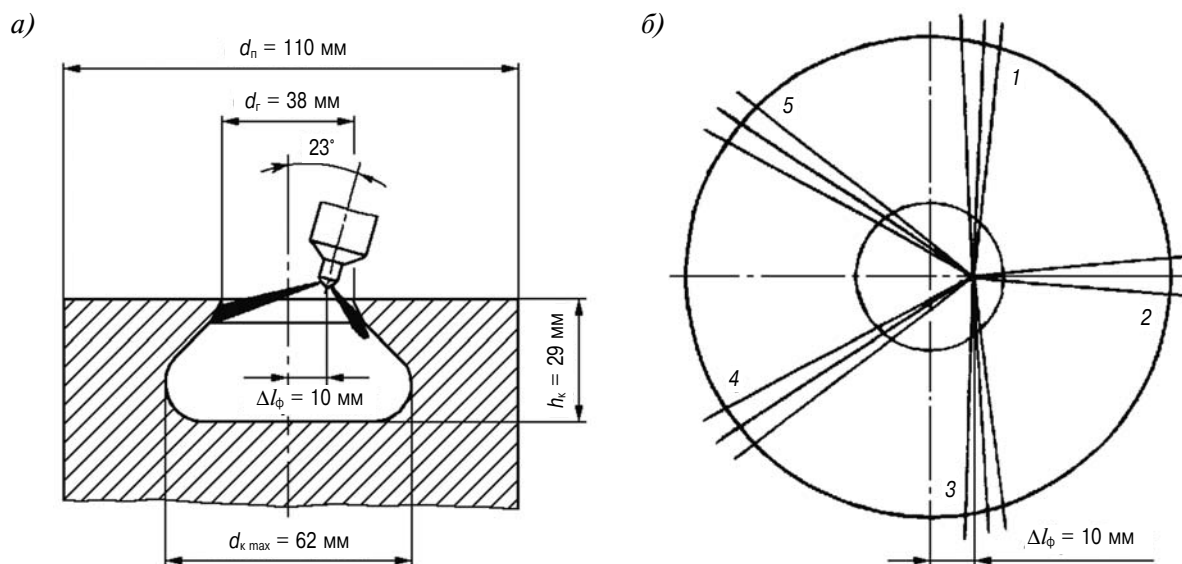


Рис. 4. Камера сгорания дизеля Д-245.12С со схемой расположения форсунки (а) и ориентация струй распыливаемого топлива в КС (б): 1–5 — номера струй распыливаемого топлива

Дизель оснащен турбокомпрессором ТКР-6 Борисовского завода автоагрегатов, ТНВД фирмы Motorpal (Чехия) модели РР4М10U1f с диаметром плунжеров  $d_{пл} = 10$  мм, их ходом  $h_{пл} = 10$  мм и форсунками ФДМ-22 АО «Куроаппаратура» (г. Вильнюс), отрегулированными на давление начала впрыскивания  $p_{ф0} = 21,5$  МПа. В исследуемом дизеле форсунки с распылителями типа DOP 119 S 534 фирмы Motorpal установлены в головке цилиндров со смещением  $\Delta l_{\phi} = 10$  мм (рис. 4).

Распылители типа DOP 119S534 фирмы Motorpal выполнены с выходом распыливающих отверстий на конус седла иглы и с диаметром иглы  $d_{и} = 5,0$  мм (по направляющей). Некоторые конструктивные параметры этих распылителей приведены в табл. 5 и 6.

При расчетных исследованиях задавался закон подачи (табл. 7), формируемый кулачками ТНВД модели РР4М10U1f на номинальном режиме работы дизеля Д-245.12С с частотой вращения коленчатого вала  $n = 2400$  об/мин и цикловой подачей топлива  $q_{ц} = 80$  мм<sup>3</sup>.

Таблица 5

Параметры распылителей DOP 119S534 фирмы Motorpal

Диаметр распыливающих отверстий $d_p$ , мм	Число распыливающих отверстий $i_p$	Максимальный ход иглы $h_{и}$ , мм	Суммарная эффективная площадь распылителя в сборе $\mu_{пф}$ , мм <sup>2</sup>
0,34	5	0,30	0,250

Примечание. величины  $\mu_{пф}$  приведены при максимальном подъеме иглы форсунки; указаны значения  $h_{и}$  и  $\mu_{пф}$ , средние для комплекта распылителей.

Таблица 6

Расположение распыливающих отверстий распылителей DOP 119S534 фирмы Motorpal

№ отверстия	Угловое расположение отверстия относительно штифта, град	Угол наклона отверстия относительно оси распылителя, град
1	8	63,5
2	90	72
3	172	63
4	237	52,5
5	303	53,5

Примечание. нумерация распыливающих отверстий проведена от штифта корпуса распылителя.

При расчетных исследованиях показателей рабочего процесса дизеля типа Д-245.12С, проведенных с использованием ПК ДИЗЕЛЬ-РК, использованы данные по физико-химическим свойствам смесей нефтяного ДТ и РМ, представленные в табл. 2 и 3. Расчетные характеристики показателей процессов распыливания исследуемых топлив и смесеобразования на номинальном режиме ( $n = 2400$  об/мин,  $q_{ц} = 80$  мм<sup>3</sup>) показаны в табл. 8 на рис. 5. Эти характеристики получены в диапазоне изменения объемной концентрации РМ в смесевом биотопливе  $C_{РМ}$  от 0 % (чистое ДТ) до 100 % (чистое РМ). По данным табл. 8 и рис. 5 следует отметить тенденцию ухудшения характеристик процессов впрыскивания и распы-

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

90 % ДТ + 10 % ПМ	90 % ДТ + 10 % СМ	90 % ДТ + 10 % КМ	90 % ДТ + 10 % ЛМ	90 % ДТ + 10 % ГМ	90 % ДТ + 10 % РыжМ
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	$9,2 \cdot 10^{-5}$		

ливания топлива с увеличением содержания РМ в смеси с ДТ. Так, в диапазоне изменения  $C_{PM}$  от 0 до 100 % средний диаметр капель по Заутеру  $d_{к,ср}$  возрастает от 24,3 до 39,4 мкм, длина струи на момент окончания впрыскивания  $L$  увеличивается от 41,9 до 48,4 мм, угол раскрытия внешнего контура струи  $\gamma$  уменьшается от 20,8 до 15,8 град. С ростом концентрации РМ в смеси с ДТ  $C_{PM}$  от 0 до 100 % доля топлива в ядре струи  $C_{ядра}$  возрастает от 5,8 до 23,1 %, доля топлива в оболочке струи  $C_{обол}$  уменьшается от 77,1 до 34,9 %, доля топлива в оболочке пристеночного потока  $C_{прис}$  увеличивается от 17,1 до 42,0 %.

Представленные данные свидетельствуют о том, что с точки зрения качества процессов распыливания топлива и смесеобразования возможна работа исследуемого дизеля при любой концентрации РМ в смесевом биотопливе. Вместе с тем в ряде исследований дизелей, работающих на чистых растительных маслах или на смесях нефтяного ДТ и растительных масел, показано, что длительная работа двигателя на этих топливах может сопровождаться закоксовыванием отверстий распылителей форсунок и отложением нагара на стенках КС [11, 19]. В связи с этим обычно органи-

зуется работа дизеля не на чистых растительных маслах, а на нефтяном ДТ с небольшими добавками растительных масел [4, 20, 21]. Поэтому последующие расчеты проведены для дизеля, работающего на нефтяном ДТ с небольшими добавками РМ в количестве от 0 до 10 % по объему. Результаты этих расчетных исследований приведены в табл. 9 и на рис. 6. Они свидетельствуют о том, что на номинальном режиме работы дизеля в указанном диапазоне изменения  $C_{PM}$  удельный эффективный расход топлива  $g_e$  возрастает от 225,7 до 228,7 г/кВт·ч, что объясняется уменьшением теплотворной способности топлива с ростом концентрации РМ в смеси с ДТ (см. табл. 3). Но при этом эффективный КПД дизеля  $\eta_e$  изменяется незначительно.

Расчетные данные свидетельствуют о том, что при увеличении концентрации РМ в нефтяном ДТ  $C_{PM}$  от 0 до 10 % концентрация в ОГ оксидов азота  $C_{NOx}$  снижается от 677 до 660 ppm, что обусловлено некоторым ухудшением качества рабочего процесса (снижением эффективного КПД дизеля  $\eta_e$ ). В этом же диапазоне изменения концентрации  $C_{PM}$  дымность ОГ  $K_x$  снижается от 11,2 до 9,0 % по шкале Хартриджа, что объясняется

Таблица 8

**Расчетные характеристики показателей процессов распыливания исследуемых топлив  
и смесеобразования на номинальном режиме с  $n = 2400$  об/мин и  $q_c = 80$  мм<sup>3</sup>**

Параметры распыливания топлива	Топлива					
	ДТ	80 % ДТ + 20 % РМ	60 % ДТ + 40 % РМ	40 % ДТ + 60 % РМ	20 % ДТ + 80 % РМ	РМ
Средний диаметр капель по Заутеру $d_{32}$ , мкм	24,3	28,0	31,0	34,0	36,6	39,4
Длина струи на момент окончания впрыскивания $L$ , мм	41,9	43,4	44,8	46,1	47,3	48,4
Угол раскрытия внешнего контура струи на момент окончания впрыскивания $\gamma$ , град	20,8	19,6	18,5	17,5	16,6	15,8
Доля топлива в оболочке струи $C_{обол}$ , %	77,1	69,1	61,8	50,7	40,8	34,9
Доля топлива в ядре струи $C_{ядра}$ , %	5,8	8,1	10,3	13,1	17,3	23,1
Доля топлива в оболочке пристеночного потока $C_{прис}$ , %	17,1	22,8	27,9	36,2	41,9	42,0



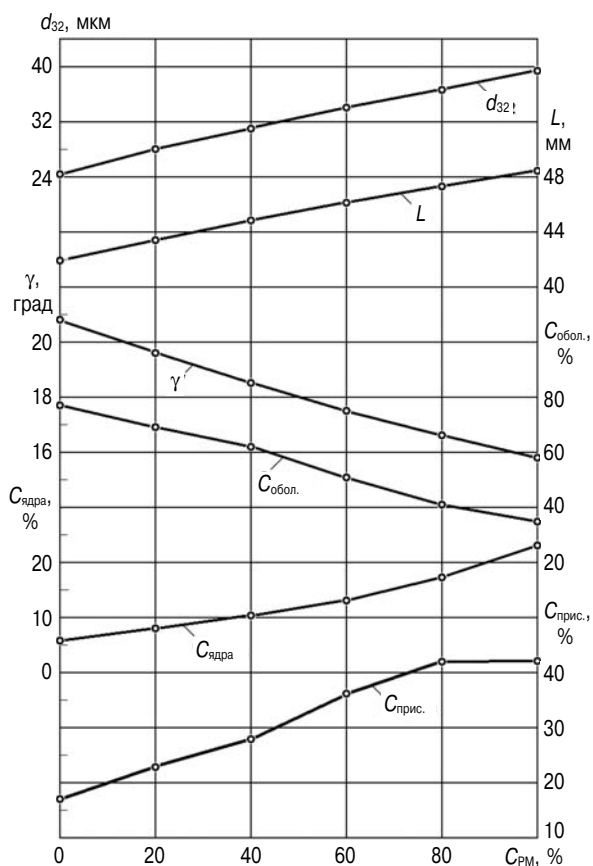


Рис. 5. Зависимость среднего диаметра капель по Заутеру  $d_{32}$ , длины струи  $L$  и угла раскрытия струи  $\gamma$  на момент окончания впрыскивания, доли топлива в ядре свободной струи  $C_{\text{ядра}}$ , доли топлива в оболочке струи  $C_{\text{обол.}}$  и доли топлива в оболочке пристеночного потока  $C_{\text{прис.}}$  от объемной концентрации РМ в смешанном биотопливе  $C_{PM}$

увеличением содержания атомов кислорода в молекулах топлива (см. табл. 3).

В заключение анализа характеристик показателей рабочего процесса исследуемого дизеля при использовании в качестве топлива смесей ДТ и РМ следует отметить, что они хорошо согласуются

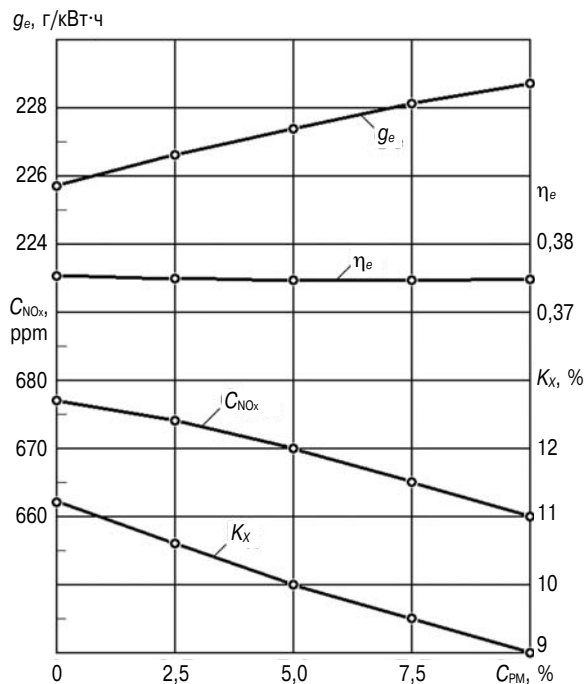


Рис. 6. Зависимость удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ , эффективного КПД дизеля  $\eta_e$ , концентрации влажных оксидов азота в ОГ  $C_{NOx}$ , дымности ОГ по шкале Хартриджа  $K_x$  от объемной концентрации РМ в смешанном биотопливе  $C_{PM}$

с экспериментально полученными характеристиками, приведенными в работах [4, 19, 22].

### Заключение

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования подтвердили эффективность использования смешанных биотоплив, содержащих нефтяное дизельное топливо и рапсовое масло, в дизелях транспортного и сельскохозяйственного назначения. Экспериментальные и расчетные характеристики подтвердили приемлемое качество процессов распыливания топлива и смесеобразования и возможность улучшения показателей токсичности отработавших газов дизеля типа

Таблица 9

Расчетные характеристики показателей рабочего процесса дизеля Д-245.12С на номинальном режиме с  $n = 2400$  об/мин и  $q_c = 80$  мм<sup>3</sup>

Параметры дизеля	Топлива				
	ДТ	97,5 % ДТ + 2,5 % РМ	95,0 % ДТ + 5,0 % РМ	92,5 % ДТ + 7,5 % РМ	90,0 % ДТ + 10,0 % РМ
Удельный эффективный расход топлива $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$	225,7	226,6	227,4	228,1	228,7
Эффективный КПД дизеля $\eta_e$	0,3753	0,3749	0,3747	0,3747	0,3748
Объемное содержание оксидов азота в ОГ $C_{NOx}, \text{ppm}$	677	674	670	665	660
Дымность ОГ $K_x, \%$ по шкале Хартриджа	11,2	10,6	10,0	9,5	9,0

Д-245.12С при использовании в качестве топлива указанных смесей. В связи с возможностью закоксовывания распыливающих отверстий форсунок и отложения нагара на деталях камеры сгорания рекомендована работа дизеля не на чистых растительных маслах, а на нефтяном дизельном топливе с небольшой добавкой рапсового масла в количестве до 10 % по объему. Следует также отметить, что результаты расчетных исследований показателей дизеля

получены без какой-либо оптимизации конструкции двигателя и параметров рабочего процесса. Необходимо также отметить возможность оптимизации состава смесового биотоплива.

### Литература

1. *Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.* Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. 311 с.

2. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А.А. Александров [и др.] / под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. 791 с.

3. *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.

4. Моторные топлива, производимые из растительных масел / В.А. Марков [и др.] / под ред. В.А. Маркова. Рига: Изд-во Lambert Academic Publishing, 2019. 420 с.

5. *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.

6. *Ощепков П.П., Смирнов С.В., Заев И.А.* Исследование процесса самовоспламенения биодизельного топлива // Двигателестроение. 2020. № 1. С. 47–51.

7. *Che Mat S., Idroas M.Y., Hamid M.F. et al.* 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. p. 808–823.

8. *Anantha Raman L., Deepanraj B., Rajakumar S., Sivasubramanian V.* Experimental Investigation on Performance, Combustion and Emission Analysis of a Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Rapeseed Oil Biodiesel // Fuel. 2019. Vol. 246. p. 69–74.

9. *Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И.* Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.

10. *Ершов Ю.А., Зайцев Н.И.* Основы биохимии для инженеров / Под ред. С.И. Шукина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 359 с.

11. *Звонов В.А., Козлов А.В., Теренченко А.С.* Исследование эффективности применения в дизельных

двигателях топливных смесей и биотоплив // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LII. № 6. С. 147–151.

12. Кодекс Алиментариус (лат. «Продовольственный кодекс»). Жиры, масла и производные продукты: Пер. с англ. М.: Изд-во «Весь мир», 2007. 68 с.

13. *Уханов А.П., Година Е.Д.* Определение теплоты сгорания дизельного смесового топлива из соевого масла // Вестник Северо-Восточного федерального университета. 2013. Т. 10. № 5. С. 25–29.

14. Нефтяные моторные топлива: экологические аспекты применения / А.А. Александров [и др.] / под ред. А.А. Александрова, В.А. Маркова. М.: ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2014. 691 с.

15. 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.

16. *Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А.* Системы топливоподачи и управления дизелей. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. 344 с.

17. *Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И.* Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 360 с.

18. *Кулешов А.С.* Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. Расчет распределения топлива в струе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2007. Специальный выпуск «Двигатели внутреннего сгорания». С. 18–31.

19. *Девянин С.Н., Марков В.А., Семенов В.Г.* Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. М.: Изд-во МГАУ им. В.П. Горячкина, 2008. 340 с.

20. *Марков В.А., Девянин С.Н., Камалтдинов В.Г., Са Бовэнь, Неверов В.А.* Показатели токсичности отработавших газов дизельного двигателя, работающего на нефтяном дизельном топливе с добавками растительных масел // Двигателестроение. 2020. № 4. С. 18–24.

21. *Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А.* Применение в дизелях нетрадиционных топлив как добавок к основному. М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2014. 162 с.

22. Биотоплива для двигателей внутреннего сгорания / В.А. Марков и др. М.: НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2016. 292 с.