

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕХНИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А.С. Поляков, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации;

А.В. Федоров, доктор технических наук;

Н.Ю. Кожевникова, кандидат химических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Оценены необходимость и возможность представления основных количественных показателей углеводородных жидкостей безразмерным комплексом на основе метода анализа размерностей.

Ключевые слова: углеводородные жидкости, топлива, физико-химические свойства, пожароопасные и противоизносные свойства, электромагнитное воздействие, обобщенный показатель свойств

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE MAIN QUANTITATIVE INDICATORS OF SERVICE PROPERTIES OF TECHNICAL HYDROCARBON LIQUIDS

A.S. Polyakov; A.V. Fedorov; N.Yu. Kozhevnikova.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

We estimated necessity and possibility of representation of the main quantitative indicators of hydrocarbon fluids by a dimensionless complex on the basis of the dimensional analysis method.

Keywords: hydrocarbon fluids, fuels, physical and chemical properties, fire-hazardous and anti-wear properties, electromagnetic impact, generalized property index

Из множества эксплуатационных свойств углеводородов, применяемых на технике в качестве источника энергии или рабочих жидкостей в системах смазки и управления, принято выделять их взрывопожарную опасность, противоизносные и низкотемпературные свойства. Именно они являются основными, поскольку определяют безопасность людей, энергетику сгорания и надежность функционирования техники.

В свою очередь, эти свойства зависят от физико-химической природы исходного сырья (как правило, нефти) и совершенства технологий производства технических углеводородных жидкостей.

Изучение нормативной документации (стандартов, технических условий), определяющих требования к качеству продукции, показывает, что, несмотря на многообразие факторов влияния, эксплуатационные свойства технических углеводородных жидкостей принято оценивать (в основном) показателями фракционного состава, плотности, давления насыщенных паров, температуры вспышки и кинематической вязкости. В свою очередь, эти показатели между собой взаимосвязаны. Поэтому неслучайно техническими условиями на их производство и применение в первую очередь нормирован фракционный состав [1, 2].

Современный этап улучшения эксплуатационных характеристик технических углеводородных жидкостей характеризуется тем, что, наряду с традиционными способами,

за счет повышения качества переработки нефти исследователи изучают влияние на них электромагнитного поля и других способов воздействия (например, при транспортировании и сгорании топлив, применении масел в двигателях техники аварийно-спасательного назначения и др.).

В последние годы опубликован ряд работ, в которых приведены результаты воздействия электрического и магнитного полей на физико-химические свойства технических углеводородных жидкостей, применяемых силовыми установками транспортных средств. Среди них отметим [1, 3–5], где в качестве объектов исследования использованы автомобильные бензины (АИ-92 и АИ-95), авиационные топлива (Т-1, ТС-1, РТ), дизельные топлива (Л-0,2-40, Л-0,5-40), маловязкое масло МС-8п при характерных для них скоростях течения и давления. Перед исследователями стояла задача выбора показателей технических углеводородных жидкостей с целью оценки влияния этого воздействия. Она решалась с использованием единичных показателей (вязкость, плотность, поверхностное натяжение), определяемых по общепринятым методикам или показателей, комплексно характеризующих результат взаимодействия исследуемой жидкости и электромагнитного поля (диэлектрическая проницаемость, магнитная восприимчивость, напряженность).

Правомочность применения единичных показателей не вызывает сомнения, поскольку их определяют по аттестованным методикам и на допущенных к применению приборах, что позволяет гарантировать точность получаемых результатов (по допускаемой величине погрешности при доверительной вероятности не менее 0,95).

В то же время комплексное изучение электрофизических и эксплуатационных характеристик углеводородных жидкостей предпочтительней, поскольку позволяет более полно судить о происходящих процессах и правильно выбирать оптимальные режимы воздействия. Однако и в этом случае должна быть гарантирована метрологическая достоверность получаемых результатов измерений, то есть должна быть установлена взаимозависимость комплексных и единичных показателей свойств углеводородных жидкостей. В анализируемых авторами работах этот вопрос не рассмотрен или только обозначен, применены авторские технические средства измерений, не допущенные установленным порядком к применению в России.

По авторитетным источникам [6, 7] диэлектрическая проницаемость углеводородов нефтяного происхождения увеличивается с возрастанием их плотности, молекулярной массы и при переходе от класса насыщенных к ненасыщенным соединениям. С увеличением температуры диэлектрическая проницаемость углеводородных жидкостей уменьшается. При этом следует помнить, что насыщенные и ненасыщенные углеводороды имеют различия по величинам плотности, вязкости и поверхностного натяжения, а сами величины зависят от температуры.

Известны корреляционные связи величин вязкости и поверхностного натяжения от плотности жидких углеводородов [6, 7]:

$$\sigma = 51,5 \rho - 16,6; \quad \eta = \mu / \rho,$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; η – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

В свою очередь, плотность и вязкость жидкости являются функцией температуры, что (в качестве примера) отражено на рис. 1, 2 для топлив реактивных двигателей [6].

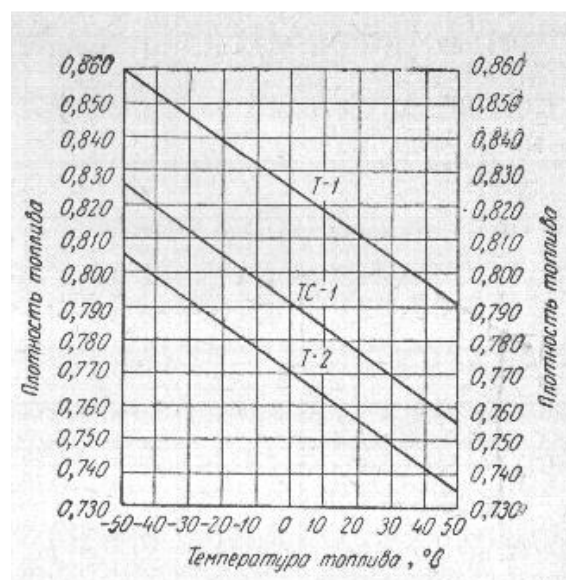


Рис. 1. Изменение плотности отечественных топлив для воздушно-реактивных двигателей (ВРД) от температуры

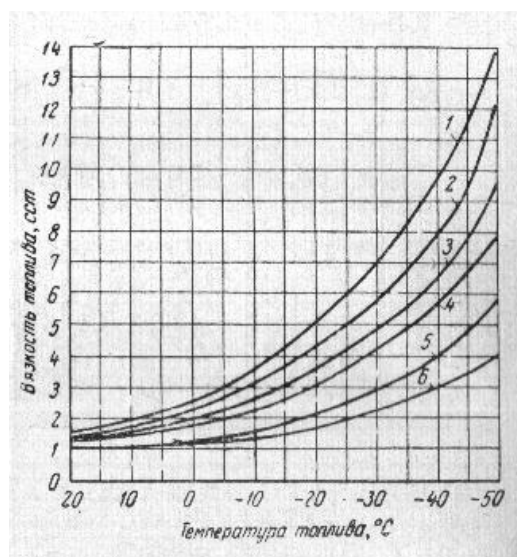


Рис. 2. Изменение кинематической вязкости топлив для ВРД различных стран-производителей от температуры: 1 – отечественное Т-1; 2 – датское; 3 – английское JP-1; 4 – отечественное ТС-1; 5 – отечественное Т-2; 6 – шведское JP-4

Величину поверхностного натяжения для рассматриваемого класса углеводородных жидкостей можно рассчитать (с погрешностью 10 %–15 %) по формулам [7]:

$$\sigma_t = \sigma_0 - \kappa(t - t_0) \text{ (для температур } -30^\circ\text{C до } 100^\circ\text{C);}$$

$$\sigma_T = M(\alpha - \beta T),$$

где σ_0 – поверхностное натяжение при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении; σ_t – поверхностное натяжение при температуре $t^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении; σ_T – поверхностное натяжение при температуре T (шкалы Кельвина) при атмосферном нормальном давлении; κ , α , β – коэффициенты пропорциональности, принимаемые по известным справочным данным.

Из приведенных данных следует общая закономерность: чем выше плотность, тем больше численные значения поверхностного натяжения и динамической вязкости жидких углеводородов.

В связи с этим возникает целесообразность – единичные показатели представлять совокупно – единым комплексным показателем свойств жидких углеводородов. Эта задача может быть решена на основе метода анализа размерностей [8] и представлена, например, в виде безразмерного обобщающего комплекса π , отражающего основные эксплуатационные свойства жидкости:

$$\pi = \frac{\sigma}{\rho v \eta}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; v – скорость движения жидкости в узле трения или трубопроводе, м/с; η – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Проверка адекватности уравнения (1) выполнена на топливах Т-1 и ТС-1, поскольку для них имеются достоверные и обширные сведения, накопленные за 60-летнюю историю реактивной авиации (табл. 1).

Таблица 1. Основные показатели эксплуатационных свойств топлив Т-1 и ТС-1 [6, 7]

Топливо	Температура (t), °С	Кинематическая вязкость (η)*10 ⁻⁶ , м ² /с	Поверхностное натяжение (σ)*10 ⁻³ , Н/м	Плотность (ρ), кг/м ³	Обобщенный показатель свойств топлив (π)
Т-1	-50	14,14	34,41	860,0	5,7
	-20	4,13	30,55	840,0	17,6
	+20	1,66	26,79	810,0	39,9
	+60	0,94	23,14	780,0	63,1
ТС-1	-50	8,09	31,77	815,0	9,6
	-20	2,95	28,10	800,0	23,8
	+20	1,34	24,53	775,0	46,8
	+60	0,80	21,06	750,0	70,0

При расчетах скорость течения жидкости принята постоянной (0,5 м/с – известное значение в узлах трения механизмов). Температурный диапазон (-50 до +60 °С) учитывает эксплуатационные требования к работоспособности техники отечественного производства в соответствующих климатических широтах [9].

Согласно работе [8], если у двух объектов исследования наблюдается равенство безразмерных показателей по уравнению (1), то это означает, что их свойства (качество продукции) – одинаковы.

Расчеты показали, что значения обобщенного коэффициента у топлив Т-1 и ТС-1 (в сравниваемых температурных условиях) могут существенно различаться (табл. 2, рис. 3), что определяется их фракционным составом.

Таблица 2. Результаты сравнительной оценки свойств топлив по обобщенному показателю

Температура, °С	Топливо Т-1, π_1	Топливо ТС-1, π_2	Разность коэффициентов $\Delta\pi = \pi_2 - \pi_1$	Разность оценок приведенная $\frac{\Delta\pi}{\pi_2}, \%$
-50	5,7	9,6	3,9	40,6
-20	17,6	23,8	6,2	26,1
+20	39,8	47,2	7,4	15,7
+60	63,5	70,0	6,5	9,3

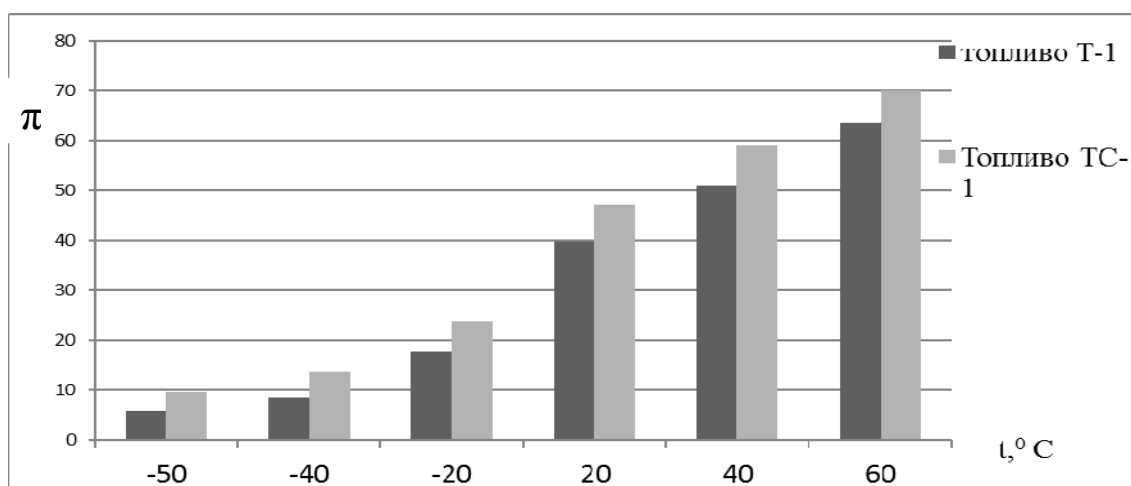


Рис. 3. Чувствительность обобщенного показателя топлив для ВРД к изменению температуры

Разность оценок достигает 9,3 % (при температуре +60 °С) и 40,6 % (при температуре -50 °С), которая (помимо влияния температуры и фракционного состава) включает погрешности методов определения характеристик поверхностного натяжения, плотности и кинематической вязкости жидкостей.

Для оценки значимости расхождений, представленных в табл. 2, определена относительная методическая погрешность $\delta\pi$ полученных результатов по зависимости:

$$\delta\pi = \sqrt{\delta(\sigma)^2 + \delta(\rho)^2 + \delta(\vartheta)^2 + \delta(\eta)^2}, \quad (2)$$

где $\delta(\sigma)$, $\delta(\rho)$, $\delta(\vartheta)$, $\delta(\eta)$ – значения относительных погрешностей (%) величин, входящих в уравнение (1). Они приняты по опубликованным данным о точности и достоверности соответствующих методов испытаний жидкостей:

$$\delta(\sigma)=1,5-2,0; \quad \delta(\rho)=0,25-1,5; \quad \delta(\vartheta)=0,1-1,0; \quad \delta(\eta)=0,3-1,5.$$

Учитывая эти значения, следует ожидать, что величина относительной погрешности метода расчета обобщенного показателя основных эксплуатационных свойств не превысит $\delta\pi=2,5\%$.

Таким образом, обобщенный показатель может достоверно отражать изменения эксплуатационных свойств технических углеводородных жидкостей, если они более $\delta\pi=2,5\%$.

С этих позиций оценены основные эксплуатационные свойства современных топлив для реактивных двигателей [2, 10], которые отражены в табл. 3 (расчетные значения) и на рис. 4.

Таблица 3. Основные показатели свойств современных отечественных топлив для ВРД

Топливо	Температура (t), °С	Кинематическая вязкость (η)*10 ⁻⁶ , м ² /с	Поверхностное натяжение (σ)*10 ⁻³ , Н/м	Плотность (ρ), кг/м ³	Обобщенный показатель свойств топлив (π)
Т-1	-50	14,14	34,41	860,0	5,7
	-40	8,59	32,47	853,8	8,6
	-20	4,13	30,55	840,0	17,6
	+20	1,66	26,79	810,0	39,8
	+40	1,21	24,95	806,7	51,1
	+60	0,935	23,14	780,0	63,5

ТС-1	-50	8,09	31,77	815,0	9,6
	-40	5,42	29,93	812,8	13,6
	-20	2,95	28,10	800,0	23,8
	+20	1,34	24,53	775,0	47,2
	+40	1,01	22,78	765,2	59,0
	+60	0,802	21,06	750,0	70,0
Т-2	-50	6,13	31,45	818,3	12,5
	-40	4,22	29,49	809,5	17,3
	-20	2,38	27,58	795,1	29,1
	+20	1,12	23,80	766,3	55,5
	+40	0,854	21,96	751,9	68,4
	+60	0,681	20,15	734,7	80,5
РТ	-50	7,24	31,51	825,0	10,6
	-40	5,0	29,71	821,2	14,5
	-20	2,83	27,93	806,8	24,5
	+20	1,34	24,44	778,0	47,8
	+40	1,03	22,73	763,6	57,8
	+60	0,824	21,05	749,2	68,2

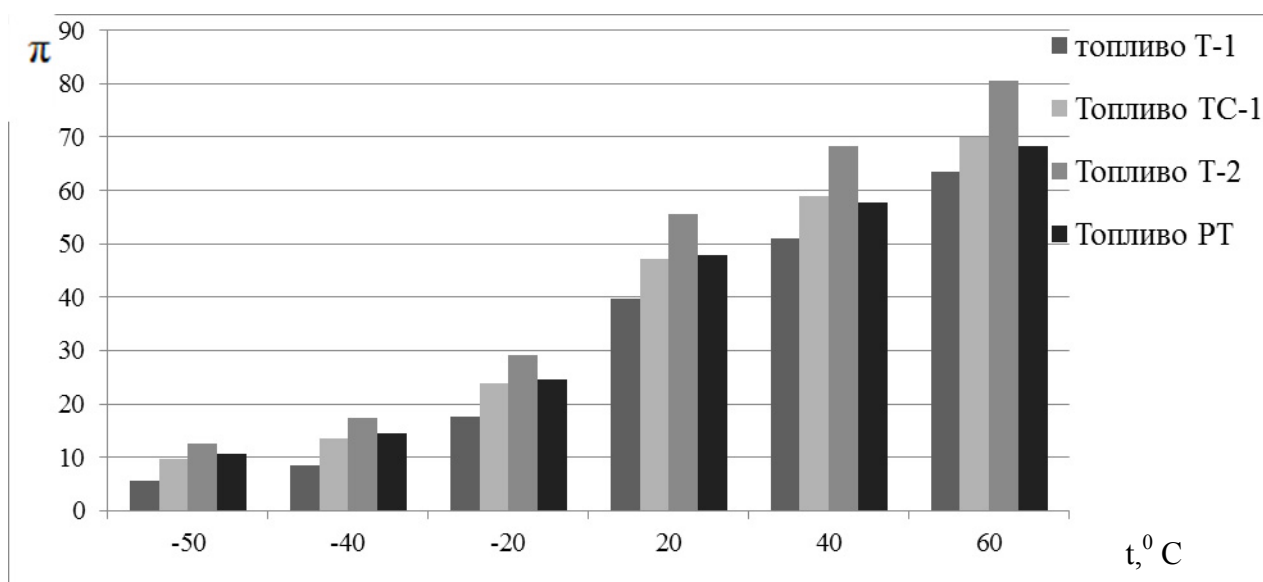


Рис. 4. Изменение обобщенного показателя свойств топлив от температуры

Из приведенных данных следует, что предлагаемый показатель (уравнение (1)) вполне приемлем для комплексной оценки основных свойств углеводородных жидкостей, нашедших применение на различных видах техники, включая авиацию и другие виды транспорта.

Вместе с тем следует помнить, что значения плотности, кинематической вязкости и поверхностного натяжения топлив (табл. 3) приведены без учета возможного добавления в них от 0,1 до 0,3 % (объемных) этилцеллозольва (техническое название жидкость «И») или тетрагидрофурурилового спирта (техническое название жидкость «ТГФ») с целью предотвращения образования кристаллов льда при низких температурах [11–13].

Этилцеллозольв [12] – легковоспламеняющаяся жидкость с плотностью при 20 °С не менее 0,928 г/см³. Показатели пожаровзрывоопасности: температура вспышки паров в закрытом тигле – от 40 до 46 °С; температура самовоспламенения – не менее 228 °С; концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения): нижний – не менее 1,8 % (по объему), верхний – не более 15,7 % (по объему); температурные пределы распространения пламени (воспламенения): нижний – не менее 39 °С, верхний – не более 74 °С.

Тетрагидрофурфуриловый спирт [13] – горючая жидкость с плотностью при 20 °С не менее 1,0495 г/см³. Показатели пожаровзрывоопасности: температура вспышки (открытый тигель) не менее 75 °С, температура самовоспламенения – 258 °С, температурные пределы воспламенения: нижний – (72±5) °С, верхний – (108±5) °С; концентрационные пределы воспламенения: нижний – 1,5 %, верхний – 9,7 %.

Введение в топливо этилцеллозольва или тетрагидрофурфурилового спирта относят к физико-химическим способам улучшения эксплуатационных свойств топлив, которые в принципе способны повлиять на достоверность оценок влияния иных способов воздействия (включая наиболее изучаемые в настоящее время электрофизические способы) на топлива. В опубликованных материалах не удалось найти сведений о результатах комплексного воздействия электрофизических и физико-химических способов на единичные показатели топлив.

По рассмотренной методике комплексно оценены основные показатели эксплуатационных свойств дизельных топлив и автомобильных бензинов (табл. 4, 5, рис. 5, 6).

Таблица 4. Основные показатели эксплуатационных свойств дизельных топлив

Топливо	Температура (t), °С	Кинематическая вязкость (η)*10 ⁻⁶ , м ² /с	Поверхностное натяжение (σ)*10 ⁻³ , Н/м	Плотность (ρ), кг/м ³	Обобщенный показатель свойств топлив (π)
ДТ (Л)	+20	6,0	30,8	860	11,9
ДТ (З)	+20	4,5	38,7	845	20,4
ДТ (А)	+20	3,5	46,5	835	31,9

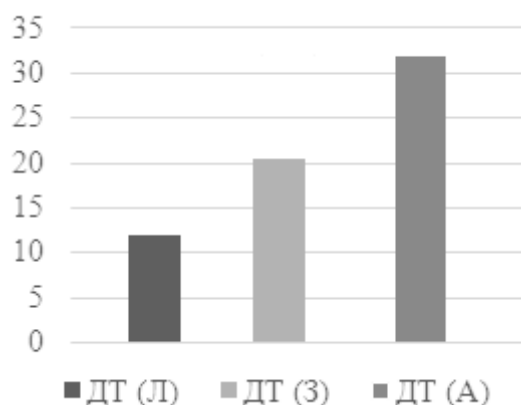


Рис. 5. Обобщенная характеристика свойств дизельных топлив при 20 °С

Таблица 5. Основные показатели эксплуатационных свойств автомобильных бензинов

Бензин	Температура (t), °С	Кинематическая вязкость (η)*10 ⁻⁶ , м ² /с	Поверхностное натяжение (σ)*10 ⁻³ , Н/м	Плотность (ρ), кг/м ³	Обобщенный показатель свойств топлив (π)
АИ-76	+20	0,71	21,2	730,0	81,80
АИ-92	+20	0,74	22,0	750,0	79,3
АИ-95	+20	0,75	22,4	760,0	78,6
АИ-98	+20	0,76	23,0	780,0	78,6

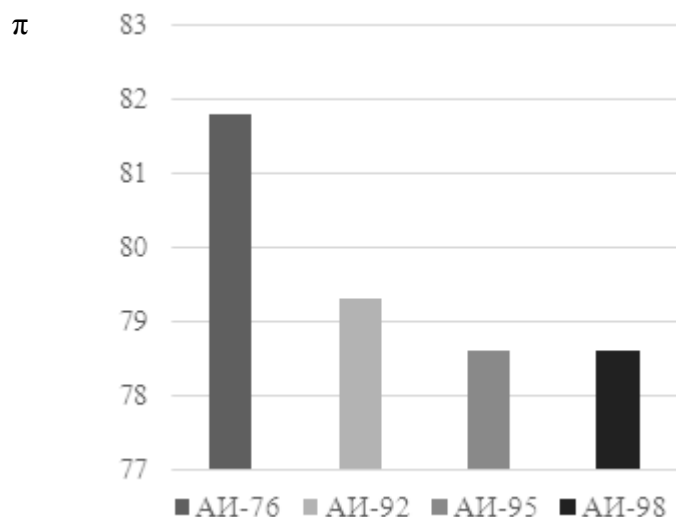


Рис. 6. Обобщенная характеристика свойств автомобильных бензинов при 20 °С

Таким образом, обобщенный показатель позволит зафиксировать влияние различных воздействий на исходное состояние углеводородных жидкостей.

Литература

1. Мурамович В.Г. Теоретико-методические основы молекулярной модификации углеводородного топлива для транспортных средств электрическими полями: автореф. СПб.: ИПТ РАН, 2013.
2. ГОСТ 10227–2013. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Информстандарт, 2014.
3. Морозова И.В. Усовершенствование процессов в камере сгорания тепловых двигателей путем электрофизического воздействия на углеводородное топливо: автореф. Киев: НАИ, 2016.
4. Симонова М.А. Электрофизический способ снижения пожарной опасности хранения и транспортировки углеводородных топлив: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2011.
5. Железнов А.Г. Диагностика надмолекулярной структуры смазочного слоя методом поляризационной трибометрии: дис. ... канд. техн. наук. Иваново: ИГУ, 2015.
6. Папок К.К., Рагозин Н.А. Технический словарь-справочник по топливу и маслам. 3-е изд. М.: Гостоптехиздат, 1963.
7. Чертков Я.Б. Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива. М.: Химия, 1968.
8. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967.
9. ГОСТ 16350–80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1980.
10. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив / И.Ф. Дубовкин [и др.]. М.: Химия, 1985.
11. Руководство по приему, хранению, подготовке к выдаче на заправку и контролю качества авиационных горюче-смазочных материалов и специальных жидкостей в предприятиях воздушного транспорта Российской Федерации. М., 1993.
12. ГОСТ 8313–88. Этилцеллозольв технический. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1988.
13. ГОСТ 17477–86. Спирт тетрагидрофуруриловый. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1986.

References

1. Muramovich V.G. Teoretiko-metodicheskie osnovy molekulyarnoj modifikacii uglevodorodnogo topliva dlya transportnyh sredstv ehlektricheskimi polyami: avtoref. SPb.: IPT RAN, 2013.
2. GOST 10227–2013. Topliva dlya reaktivnyh dvigatelej. Tekhnicheskie usloviya. M.: Informstandart, 2014.
3. Morozova I.V. Usovershenstvovanie processov v kamere sgoraniya teplovyh dvigatelej putem ehlektrofizicheskogo vozdejstviya na uglevodorodnoe toplivo: avtoref. Kiev: NAI, 2016.
4. Simonova M.A. EHlektrofizicheskij sposob snizheniya pozharnoj opasnosti hraneniya i transportirovki uglevodorodnyh topliv: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2011.
5. Zheleznov A.G. Diagnostika nadmolekulyarnoj struktury smazochnogo sloya metodom polarizacionnoj tribometrii: dis. ... kand. tekhn. nauk. Ivanovo: IGU, 2015.
6. Papok K.K., Ragozin N.A. Tekhnicheskij slovar'-spravochnik po toplivu i maslam. 3-e izd. M.: Gostoptekhizdat, 1963.
7. Chertkov Ya.B. Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizel'nye topliva. M.: Himiya, 1968.
8. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernosti v mekhanike. M.: Nauka, 1967.
9. GOST 16350–80. Klimat SSSR. Rajonirovanie i statisticheskie parametry klimaticheskikh faktorov dlya tekhnicheskikh celej. M.: Izd-vo standartov, 1980.
10. Fiziko-himicheskie i ehkspluatacionnye svojstva reaktivnyh topliv / I.F. Dubovkin [i dr.]. M.: Himiya, 1985.
11. Rukovodstvo po priemu, hraneniyu, podgotovke k vydache na zapravku i kontrolyu kachestva aviacionnyh goryuche-smazochnyh materialov i special'nyh zhidkostej v predpriyatiyah vozdushnogo transporta Rossijskoj Federacii. M., 1993.
12. GOST 8313–88. EHtilcellozol'v tekhnicheskij. Tekhnicheskie usloviya. M.: Izd-vo standartov, 1988.
13. GOST 17477–86. Spirt tetragidrofurfurilovyj. Tekhnicheskie usloviya. M.: Izd-vo standartov, 1986.