

УДК 622.692+665.753.4

Д.А. Дроздов¹, e-mail: drozdov_mail@mail.ru; **В.В. Лунева¹**, e-mail: 2209193@mail.ru;

Д.И. Мельников¹, e-mail: nio21-25gosnii@yandex.ru

¹ Федеральное автономное учреждение «25 Государственный научно-исследовательский институт химмотологии Министерства обороны Российской Федерации» (Москва, Россия).

Аналитическое представление вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 при проведении гидравлических расчетов трубопроводов

В статье рассмотрены вопросы аналитического представления вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 при проведении гидравлических расчетов трубопроводного транспорта нефтепродуктов.

В первой части статьи дан краткий обзор наиболее распространенных формул для определения коэффициента гидравлического сопротивления. Показано, что при расчете коэффициента гидравлического сопротивления в уравнении Дарси – Вейсбаха практически для всех режимов течения и областей гидравлического трения, за исключением области так называемого вполне шероховатого (квадратичного) трения, существенное значение имеет правильный выбор значений параметра кинематической вязкости, входящего в число Рейнольдса. Нахождение коэффициента гидравлического сопротивления необходимо для расчета потерь напора (давления) на трение и определения производительности перекачки. Проведен краткий анализ существующих формул для аналитического представления вязкостно-температурных характеристик нефтепродуктов.

Во второй части статьи представлены результаты исследования вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 вида III (содержание серы – не более 10 мг/кг), классов 4, 3, 2 и сорта С, выпускаемых в настоящее время различными заводами-изготовителями. Представлены значения основных физико-химических и эксплуатационных показателей исследуемых образцов дизельных топлив, а также результаты исследований по изменению значений кинематической вязкости в зависимости от температуры.

В результате обработки экспериментальных данных исследуемых образцов получены аналитические зависимости, позволяющие определять значения кинематической вязкости дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 при заданной температуре. Проведено сравнение результатов расчетов кинематической вязкости по предложенным зависимостям, а также по формулам Вальтера – ASTM и Рейнольдса – Филонова с экспериментальными данными. Предложенные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными исследуемых образцов и могут быть рекомендованы для использования при проведении гидравлических расчетов трубопроводов.

Ключевые слова: дизельные топлива, кинематическая вязкость нефтепродуктов, гидравлический расчет, коэффициент гидравлического сопротивления, формула Вальтера – ASTM, формула Рейнольдса – Филонова.

.....

Д.А. Дроздов¹, e-mail: drozdov_mail@mail.ru; **В.В. Лунева¹**, e-mail: 2209193@mail.ru;

Д.И. Мельников¹, e-mail: nio21-25gosnii@yandex.ru

¹ Federal Autonomous Enterprise «The 25th State Research Institute of Himmotology», Ministry of Defense of Russian Federation (Moscow, Russia).

Analytical Presentation Viscosity-Temperature Characteristics of Diesel Fuels Brands EURO According to GOST R 52368-2005 During Pipeline Hydraulic Calculations

In the article examined questions of the analytical presentation viscosity-temperature characteristics of diesel fuels brands EURO in accordance with GOST R 52368-2005 during hydraulic calculations of pipeline transport oil products.

The first part of the article contains overview of the most common formulas for determining the Darcy friction factor. Was shown that when calculating the Darcy friction factor in Darcy-Weisbach equation, practically for all flow regimes and conduits of hydraulic friction, with the exception of the so-called Turbulent flow in Rough-pipe conduits the correctly

choice of the values of the kinematic viscosity parameter included in the Reynolds number is essential when Fluid flow through pipelines. Finding the Darcy friction factor is necessary for calculating the friction loss pressure, as well as determining the flow rate. Was also carried out analysis of common formulas for the analytical presentation of viscosity-temperature characteristics of oil products.

In the second part of the paper, part of the article contains the results of a Research viscosity-temperature characteristics of diesel fuels in accordance with GOST R 52368-2005 type III (with total sulfur content not more than 10 mg/kg), EURO grades Class 4, Class 3, Class 2 and Sort C, produced currently time by different oil Refineries. The values of the main physico-chemical and operational parameters of the diesel fuel samples studied are presented, as well as the results of studies on the change in the kinematic viscosity values as a function of temperature.

As a result of the processing of the experimental data of the of the test samples, analytical dependencies are obtained that allow to determine the kinematic viscosity values of diesel fuels EURO according to GOST R 52368-2005 at a fixed temperature. The results of calculations of the kinematic viscosity based on the proposed dependences are compared, as well as using the Valter-ASTM and Reynolds-Filonov formulas with experimental data. The proposed dependences are in good agreement with the experimental data of the investigated samples and can be recommended for use in conducting hydraulic calculations of pipelines.

Keywords: diesel fuels, kinematic viscosity of oil products, hydraulic calculation, Darcy friction factor, Walter-ASTM formula, Reynolds-Filonov formula.

Одной из основных задач при выполнении гидравлических расчетов трубопроводов является определение величины потерь напора на трение h_t . Обычно их выражают в зависимости от квадрата средней скорости движения жидкости и формулой Дарси – Вейсбаха [1, 2]:

$$h_t = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2g} \quad (1)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; l – расчетная длина

трубопровода; d – внутренний диаметр трубопровода; g – ускорение свободного падения.

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется в зависимости от режима течения. Границы режимов течения и областей гидравлического трения устанавливают в зависимости от числа Рейнольдса Re и коэффициента относительной шероховатости внутренней поверхности трубы ε [1–3].

Число Рейнольдса определяется из соотношения

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости перекачиваемой жидкости. Коэффициент относительной шероховатости труб равен

$$\varepsilon = \frac{k_3}{d} \quad (3)$$

Таблица 1. Формулы для определения коэффициента гидравлического сопротивления

Table 1. Formulas for determination of the Darcy friction factor

Режим течения Flow mode	Формула для определения коэффициента гидравлического сопротивления The formula for determination of the Darcy friction factor	
Ламинарный (формула Стокса) Laminar (the Stokes formula)	$\lambda = 64/Re$	
Переходная зона (формула Вуллиса – Гинзбурга) Transition area (the Vullis – Ginzburg Formula)	$\lambda = \frac{64}{Re} \cdot (1 - \gamma) + \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \cdot \gamma$ $\gamma = 1 - \exp[-0,002 \cdot (Re - 2320)]$	
Турбулентный Turbulent	Область гладкого трения (формула Блазиуса) Smooth friction area (the Blauzius formula)	$\lambda = 0,3164/Re^{0,25}$
	Область смешанного трения (формула Альтшуля) Mixed Friction area (the Altshul formula)	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{k_3}{d} \right)^{0,25}$
	Область вполне шероховатого (квадратичного) трения (формула Шифринсона) Sufficiently rough (square law) friction area (the Shifrinson formula)	$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{k_3}{d} \right)^{0,25}$

Ссылка для цитирования (for citation):

Дроздов Д.А., Лунева В.В., Мельников Д.И. Аналитическое представление вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 при проведении гидравлических расчетов трубопроводов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2017. № 6. С. 92–100.

Drozhdov D.A., Luneva V.V., Melnikov D.I. Analytical Presentation Viscosity-Temperature Characteristics of Diesel Fuels Brands EURO According to GOST R 52368-2005 During Pipeline Hydraulic Calculations. Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2017, No. 6, P. 92–100. (In Russian)

Таблица 2. Значения основных физико-химических и эксплуатационных показателей дизельных топлив ЕВРО классов 4, 3, 2 и сорта С в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52368-2005

Table 2. The standard values of main physicochemical and service parameters of diesel fuel (Euro 4, 3, 2 and the Type C in accordance with GOST R 52368-2005

Наименование показателя Parameter	Марка дизельного топлива Diesel fuel			
	ЕВРО класс 4 EURO Class 4	ЕВРО класс 3 EURO Class 3	ЕВРО класс 2 EURO Class 2	ЕВРО сорт С EURO Type C
Плотность при 15 °С, кг/м ³ Density at 15 °C, kg/m ³	800–840			820–845
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с (сСт) Kinematic viscosity at 40 °C, mm ² /s (cSt)	1,2–4,0	1,4–4,0	1,5–4,0	2,0–4,5
Фракционный состав: Fractional Content: • до температуры 180 °С, % (по объему) up to 180 °C, % (volume) • до температуры 340 °С, % (по объему) up to 340 °C, % (volume) • при температуре 250 °С, % (по объему) at 250 °C, % (volume) • при температуре 350 °С, % (по объему) at 350 °C, % (volume) • 95 % (по объему) перегоняется при температуре °С, % 95 % (volume) distilled at the temperature °C, %	Не более 10 Not exceeding 10 Не менее 95 Not exceeding 95 – – –			– – Менее 65 Below 65 Не менее 85 At least 85 Не выше 360 Not exceeding 360
Температура помутнения, °С Turbidity temperature, °C	Не выше –34 Not exceeding –34	Не выше –28 Not exceeding –28	Не выше –22 Not exceeding –22	–
Предельная температура фильтруемости, °С Maximum filtering temperature, °C	Не выше –44 Not exceeding –44	Не выше –38 Not exceeding –38	Не выше –32 Not exceeding –32	Не выше –5 Not exceeding –5
Температура застывания, °С Setting temperature, °C	–			

где k_3 – коэффициент эквивалентной шероховатости внутренней поверхности труб.

Выделяют три режима течения жидкости: ламинарный $Re < 2320$, переходную зону $10\,000 < Re < 2320$ и турбулентный $Re > 10\,000$. Турбулентный режим условно разделяют на три области гидравлического трения: гладкого $10\,000 < Re < 10/\varepsilon$, смешанного $10/\varepsilon < Re < 500/\varepsilon$, вполне шероховатого (квадратичного) $Re > 500/\varepsilon$. Применительно к гидравлическим расчетам трубопроводного транспорта нефтепродуктов для определения коэффициента гидравлического сопротивления рекомендуют использовать формулы, представленные в табл. 1 [1–3].

Число Рейнольдса, учитывающее влияние работы сил вязкого трения, входит практически во все зависимости для определения коэффициента гидравлического сопротивления. Только при турбулентном режиме течения в области вполне шероховатого (квадратичного) трения влияние вязкости можно не учитывать.

При проведении перекачки дизельных топлив по трубопроводам на величину гидравлических сопротивлений достаточно существенно влияет значение параметра вязкости. Поэтому требуется определять значения вязкости с возможно большей точностью. Кинематическая вязкость дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 определяется методом испытания, регламентированным ГОСТ 33, а также идентичными методами по ISO 3104, ASTM D 445 [4]. Определение кинематической вязкости нефтепродуктов при заданном диапазоне температур проводят с использованием калиброванных стеклянных вискозиметров различных типов (Оствальда, Убеллоде и др.) [5]. Шаг измерений температуры составляет обычно 5–10 °С. При этом строят вязкостно-температурные кривые.

Для выражения вязкостно-температурных характеристик нефтепродуктов в аналитическом виде предложено множество различных формул [6]. Наиболее точной считается формула Вальтера – ASTM:

$$\lg \lg(v \cdot 10^6 + 0,8) = a + b \lg T, \quad (4)$$

где T – абсолютная температура, в градусах К; a и b – коэффициенты, определяемые на основании экспериментально полученных значений кинематической вязкости v_1 и v_2 для двух температур T_1 и T_2 .

Коэффициенты a и b в формуле Вальтера – ASTM рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{[\lg \lg(v_1 + 0,8) - \lg \lg(v_2 + 0,8)]}{\lg(T_1/T_2)}, \quad (5)$$

$$a = \lg \lg(v_1 + 0,8) - b \lg T_1. \quad (6)$$

Для определения кинематической вязкости при заданной температуре T формула Вальтера – ASTM может быть представлена в следующем виде:

$$v = \exp[2,3026 - \exp[2,306 \cdot (a + b \lg T)]] - 0,8. \quad (7)$$

Также весьма широкое распространение получила формула Рейнольдса – Филонова:

Таблица 3. Фактические значения основных физико-химических и эксплуатационных показателей исследуемых дизельных топлив EBPO классов 4, 3, 2 и сорта C по ГОСТ Р 52368-2005

Table 3. The actual values of main physicochemical and service parameters of the studied samples of diesel fuels (Euro 4, 3, 2 and the Type C in accordance with GOST R 52368-2005

Наименование показателя Parameter	Марка дизельного топлива Diesel fuel			
	EBPO класс 4 EURO Class 4	EBPO класс 3 EURO Class 3	EBPO класс 2 EURO Class 2	EBPO сорт C EURO Type C
Плотность при 15 °С, кг/м ³ Density at 15 °C, kg/m ³	802,0	805,8	817,5	832,0
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с (сСт) Kinematic viscosity at 40 °C, mm ² /s (cSt)	1,44	1,66	1,726	2,57
Фракционный состав: Fractional content: • до температуры 180 °С, % (по объему) up to 180 °C, % (volume) • до температуры 340 °С, % (по объему) up to 340 °C, % (volume) • при температуре 250 °С, % (по объему) at 250 °C, % (volume) • при температуре 350 °С, % (по объему) at 350 °C, % (volume) • 95 % (по объему) перегоняется при температуре °С, % 95 % (volume) distilled at the temperature °C, %	4 Более 95 Over 95 – – –	7 96 – – –	5 97 – – –	– – 39 98 337
Температура помутнения, °С Turbidity temperature, °C	–43	–36	–30	–9
Предельная температура фильтруемости, °С Maximum filtering temperature, °C	–46	–40	–32	–12
Температура застывания, °С Setting temperature, °C	–55	–43	–46	–22

$$v = v_1 \cdot \exp[-\kappa \cdot (T - T_1)], \quad (8)$$

где κ – коэффициент крутизны термо-вязкограммы, равный

$$\kappa = \frac{\ln(v_1/v_2)}{T_2 - T_1}. \quad (9)$$

Достаточно часто нет возможности получить из специализированной ла-

боратории данные испытаний по определению кинематической вязкости на всем диапазоне температурных значений эксплуатации трубопроводов. Более того, в паспортах качества дизельных топлив по ГОСТ Р 52368-2005 кинематическая вязкость указывается только при температуре 40 °С. При этом в рассмотренных формулах Вальтера – ASTM и Рейнольдса – Филонова должны

быть известны значения кинематической вязкости как минимум при двух температурах.

Это ставит задачу поиска альтернативных подходов к аналитическому представлению вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив. Так, в работе [7] для топлив марок З и Л по ГОСТ 305-82 было предложено определять кинематическую вязкость как

Таблица 4. Коэффициенты аппроксимации в формуле (12) для исследуемых образцов дизельных топлив по ГОСТ Р 52368-2005

Table 4. Approximation coefficients by the formula (12) for the studied samples of diesel fuels by GOST R 52368-2005

Марка дизельного топлива Diesel fuel	Коэффициенты аппроксимации в формуле (12) Approximation coefficients in the formula (12)					
	a_v	b_v	c_v	d_v	e_v	f_v
EBPO класс 4 EURO Class 4	$-2,1 \cdot 10^{-9}$	$7,84 \cdot 10^{-8}$	$2,98 \cdot 10^{-6}$	$-2,725 \cdot 10^{-5}$	$-1,155 \cdot 10^{-2}$	$-5,496$
EBPO класс 3 EURO Class 3	$-1,8 \cdot 10^{-9}$	$9,33 \cdot 10^{-8}$	$8,781 \cdot 10^{-7}$	$-2,693 \cdot 10^{-5}$	$-1,09 \cdot 10^{-2}$	$-5,412$
EBPO класс 2 EURO Class 2	$-1,5 \cdot 10^{-9}$	$12,85 \cdot 10^{-8}$	$-2,548 \cdot 10^{-6}$	$4,304 \cdot 10^{-7}$	$-1,047 \cdot 10^{-2}$	$-5,36$
EBPO сорт C EURO Type C	0	0	$-2,257 \cdot 10^{-6}$	$2,453 \cdot 10^{-4}$	$-1,773 \cdot 10^{-2}$	$-5,127$

Таблица 5. Сравнение экспериментальных и расчетных значений кинематической вязкости дизельного топлива ЕВРО класс 4

Table 5. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Class 4 diesel fluid's kinematic viscosity

Температура t, °C Temperature t, °C	Кинематическая вязкость ν , 10^{-6} м ² /с (сСт) Kinematic viscosity ν , 10^{-6} m ² /s (cSt)				Относительное отклонение Δ , % Relative deviation Δ , %		
	Фактическая Measured	Расчетная по формуле Calculated by the formula			Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)
		Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)			
-45	27,14	27,14	27,141	25,469	0	0	6,16
-40	11,851	23,041	19,716	14,042	-94,42	-66,37	-18,49
-35	9,46	19,561	14,79	9,442	-106,77	-56,35	0,19
-30	7,673	16,606	11,407	7,245	-116,42	-48,66	5,58
-25	6,324	14,098	9,011	6,03	-122,92	-42,48	4,66
-20	5,364	11,968	7,267	5,242	-123,12	-35,48	2,27
-15	4,55	10,161	5,969	4,641	-123,31	-31,18	-2,0
-10	3,998	8,626	4,98	4,119	-115,76	-24,57	-3,03
0	3,049	6,217	3,61	3,192	-103,9	-18,41	-4,67
10	2,462	4,481	2,735	2,451	-81,99	-11,09	0,45
20	2,042	3,229	2,146	1,958	-58,15	-5,1	4,12
30	1,715	2,327	1,733	1,682	-35,71	-1,05	1,91
40	1,44	1,677	1,433	1,495	-16,49	0,48	-3,85
50	1,209	1,209	1,209	1,16	0	0	4,02

Таблица 6. Сравнение экспериментальных и расчетных значений кинематической вязкости дизельного топлива ЕВРО класс 3

Table 6. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Class 3 diesel fluid's kinematic viscosity

Температура t, °C Temperature t, °C	Кинематическая вязкость ν , 10^{-6} м ² /с (сСт) Kinematic viscosity ν , 10^{-6} m ² /s (cSt)				Относительное отклонение Δ , % Relative deviation Δ , %		
	Фактическая Measured	Расчетная по формуле Calculated by the formula			Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)
		Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)			
-40	22,679	22,679	22,679	22,278	0	0	1,77
-35	12,66	19,365	16,926	13,596	-52,96	-33,7	-7,39
-30	9,829	16,535	12,991	9,691	-68,22	-32,17	1,4
-25	7,849	14,118	10,217	7,655	-79,87	-30,17	2,47
-20	6,619	12,055	8,206	6,44	-82,13	-23,98	2,7
-15	5,499	10,293	6,715	5,605	-87,18	-22,11	-1,93
-10	4,871	8,789	5,584	4,949	-80,44	-14,63	-1,61
0	3,85	6,408	4,023	3,873	-66,44	-4,49	-0,59
10	3,039	4,672	3,032	3,006	-53,73	0,24	1,1
20	2,374	3,406	2,368	2,374	-43,48	0,24	0,01
30	1,985	2,483	1,905	1,96	-25,1	4,03	1,25
40	1,66	1,811	1,57	1,658	-9,07	5,44	0,11
50	1,32	1,32	1,32	1,277	0	0	3,29

Таблица 7. Сравнение экспериментальных и расчетных значений кинематической вязкости дизельного топлива ЕВРО класс 2

Table 7. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Class 2 diesel fluid's kinematic viscosity

Температура <i>t</i> , °C Temperature <i>t</i> , °C	Кинематическая вязкость ν , 10^{-6} м ² /с (сСт) Kinematic viscosity ν , 10^{-6} m ² /s (cSt)				Относительное отклонение Δ , % Relative deviation Δ , %		
	Фактическая Measured	Расчетная по формуле Calculated by the formula			Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)
		Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)			
-30	14,46	14,46	14,46	14,582	0	0	-0,84
-25	10,3	12,497	11,307	10,155	-21,33	-9,78	1,41
-20	7,768	10,8	9,036	7,858	-39,03	-16,32	-1,16
-15	6,515	9,333	7,359	6,507	-43,26	-12,96	0,12
-10	5,554	8,066	6,095	5,607	-45,23	-9,73	-0,95
0	4,415	6,024	4,36	4,365	-36,45	1,24	1,13
10	3,415	4,499	3,267	3,419	-31,75	4,34	-0,12
20	2,642	3,36	2,539	2,668	-27,19	3,88	-0,98
30	2,135	2,51	2,034	2,114	-17,55	4,72	0,98
40	1,726	1,874	1,67	1,715	-8,6	3,24	0,66
50	1,4	1,4	1,4	1,36	0	0	2,88

функцию температуры следующими выражениями:

$$\log \nu = 10^{-9} \cdot 9 \cdot t^4 - 10^{-7} \cdot 8,85 \cdot t^3 + 10^{-4} \cdot 1,1247 \cdot t^2 - 10^{-2} \cdot 1,56 \cdot t - 5,109, \quad (10)$$

$$\nu = -10^{-11} \cdot 3,16 \cdot t^3 + 10^{-9} \cdot 4,67 \cdot t^2 - 10^{-7} \cdot 2,77 \cdot t + 10^{-6} \cdot 8,43. \quad (11)$$

При использовании формул (10) и (11) температуру t надо подставлять в градусах °C, значение кинематической вязкости получается в м²/с.

В работе [7] рассматривались экспериментальные данные по дизельным топливам, выпускаемым по ГОСТ 305-73 и ГОСТ 4749-73. Данные имеют определенную давность и в настоящее время уже устарели. Изменились география добычи нефти, технологии ее переработки и, следовательно, физико-химические свойства товарных нефтепродуктов. Дизельное топливо по ГОСТ 4749-73 не производится с 1983 г. по причине отмены действия документа и перехода на ГОСТ 305-82. Менялись и требования ГОСТ 305. Поэтому нецелесообразно рекомендовать применение полученных зависимостей (10) и (11) для определения значений кинематической вязкости дизельных топлив по ГОСТ Р 52368-2005.

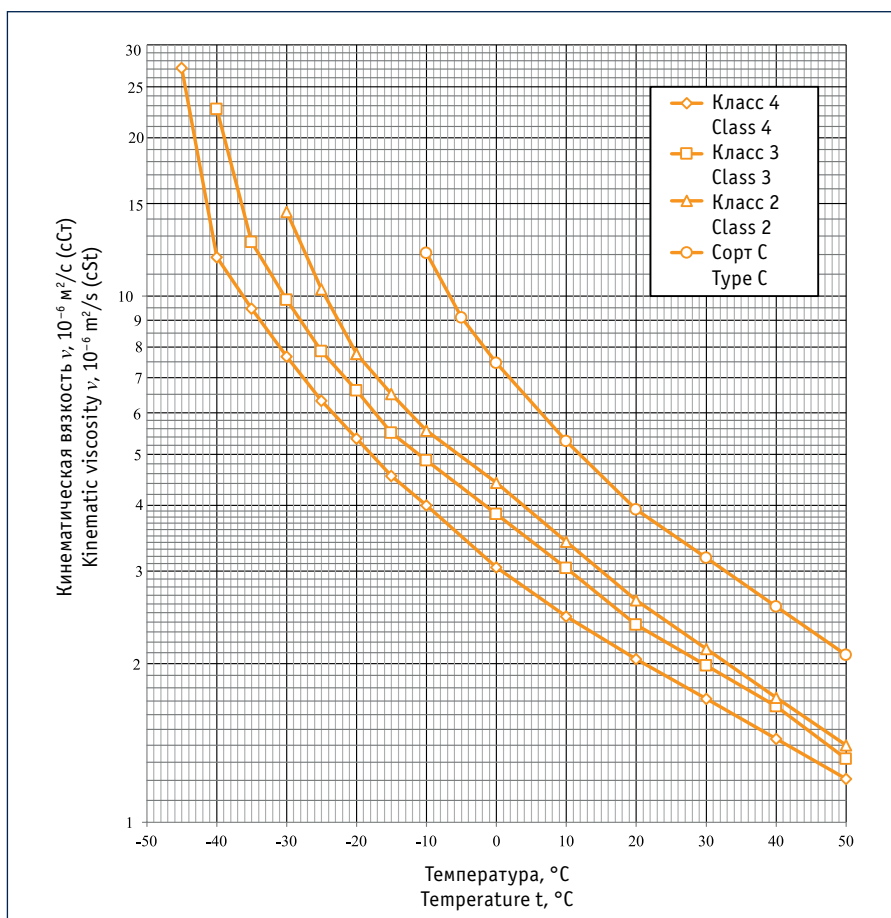


Рис. 1. Зависимость кинематической вязкости от температуры дизельных топлив ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005

Fig. 1. Kinematic viscosity temperature dependences of euro diesel fluids by GOST R 52368-2005

Таблица 8. Сравнение экспериментальных и расчетных значений кинематической вязкости дизельного топлива ЕВРО сорт С
Table 8. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Type C diesel fluid's kinematic viscosity

Температура $t, ^\circ\text{C}$ Temperature $t, ^\circ\text{C}$	Кинематическая вязкость $\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (сСт) Kinematic viscosity $\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (cSt)			Относительное отклонение $\Delta, \%$ Relative deviation $\Delta, \%$			
	Фактическая Measured	Расчетная по формуле Calculated by the formula			Рейнольдса – Филонова (7) Reynolds – Filonov (7)	Вальтера – ASTM (8) Walter – ASTM (8)	Предложенная (12) Proposed (12)
-10		12,075	12,075	12,075			
-5	9,1	10,429	9,758	9,291	-14,6	-7,23	-2,1
0	7,467	9,007	8,021	7,464	-20,62	-7,42	0,03
10	5,3	6,719	5,66	5,224	-26,77	-6,8	1,44
20	3,929	5,012	4,189	3,967	-27,55	-6,63	-0,97
30	3,178	3,738	3,222	3,169	-17,63	-1,38	0,28
40	2,57	2,788	2,556	2,581	-8,5	0,56	-0,44
50	2,08	2,08	2,08	2,078	0	0	0,1

Были проведены исследования и анализ вязкостно-температурных характеристик следующих образцов топлив дизельных ЕВРО, вид III (содержание серы – не более 10 мг/кг) по ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009) с изм. 1:

1) класс 4: производитель – ОАО «Газпром нефтехим Салават»; компонентный состав: дизельная гидроочищенная фракция 164–275 °С – 99,96 % масс., противоизносная присадка «Адди ТОП» SM/AddiTOP L – 0,04 % масс.;

2) класс 3: производитель – АО «ННК-Хабаровский НПЗ»; компонентный состав: дизельная гидроочищенная фракция 164–275 °С – 99,96 % масс., противоизносная присадка «КОЛТЕК ДС 7739» – 0,03 % масс., промотор воспламенения «КОЛТЕК ДС 1406» – 0,01 % масс.;

3) класс 2: производитель – ОАО «Ангарская нефтехимическая компания»; компонентный состав: топливо дизельное гидроочищенное с установки «Парекс» 164–275 °С – 99,97 % масс., противоизносная присадка «Байкат» – 0,04 % масс., антиокислительная присадка «Агидол-1» – 0,01 % масс., промотор воспламенения «Про-цетан плюс 51» – 0,15 % масс.;

4) сорт С: производитель – ООО «ЛУКОЙЛ-Пермнефтеоргсинтез»; компонентный состав: топливо дизельное гидроочищенное – 71,7 % масс., топливо дизельное гидродеароматизированное – 21,1 % масс., фракция гидроочищенная для производства реактивных топлив –

7,2 % масс., противоизносная присадка NALCO 5719A – 0,035 % масс., промотор воспламенения Kerobrisol EHN – 0,1 % масс.

В результате были получены данные о кинематической вязкости в зависимости от температуры топлив дизельных ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 для классов 4, 3, и 2, а также сорта С. Общий вид полученных вязкостно-температурных кривых представлен на рис. 1.

Значения основных физико-химических и эксплуатационных показателей исследуемых образцов дизельных топлив в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52368-2005 и фактических представлены в табл. 2–3.

Для аналитического представления кинематическую вязкость ν дизельных топлив, $\text{м}^2/\text{с}$, в зависимости от расчетной температуры $t, ^\circ\text{C}$, предлагается выразить следующей функцией:

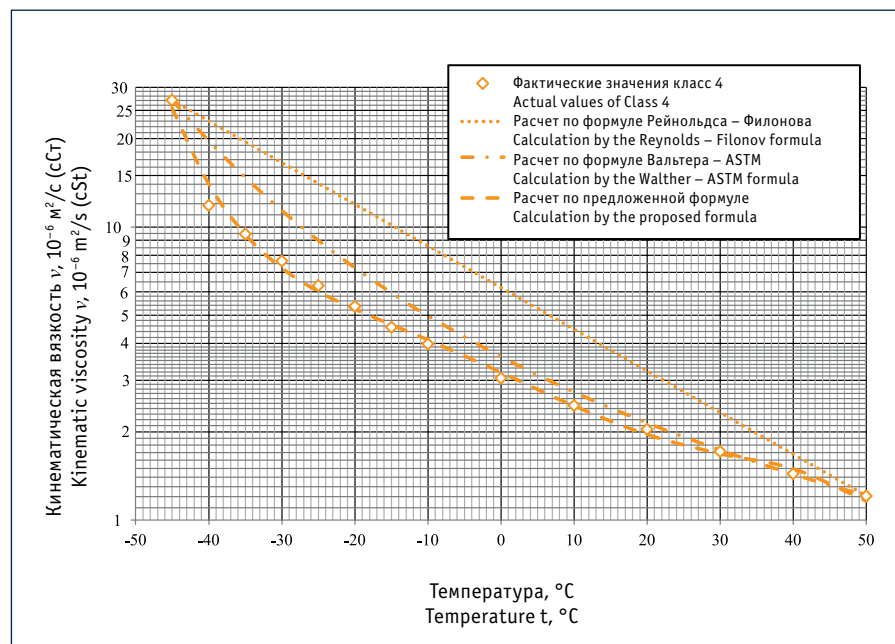


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных вязкостно-температурных характеристик дизельного топлива ЕВРО класс 4

Fig. 2. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Class 4 diesel fluid's viscosity-temperature characteristics

$$\log v = a_v \cdot t^5 + b_v \cdot t^4 + c_v \cdot t^3 + d_v \cdot t^2 + e_v \cdot t + f_v, \quad (12)$$

где a_v, b_v, c_v, d_v, e_v и f_v – коэффициенты аппроксимации. Значения коэффициентов аппроксимации для исследуемых образцов дизельных топлив по ГОСТ Р 52368-2005 представлены в табл. 4. Выражение (12) можно также записать в следующем виде:

$$v = \exp[2,3026 \cdot (a_v \cdot t^5 + b_v \cdot t^4 + c_v \cdot t^3 + d_v \cdot t^2 + e_v \cdot t + f_v)]. \quad (13)$$

Исходные данные по кинематической вязкости дизельных топлив по ГОСТ Р 52368-2005 и результаты расчетов по формулам Вальтера – ASTM (7), Рейнольдса – Филонова (8) и предложенной (12) представлены в табл. 5–8 и на рис. 2–5. При расчете коэффициентов a, b и c по формулам (5), (6) и (9) использовались значения кинематической вязкости исследуемых образцов дизельных топлив при максимальной и минимальной температуре.

Видно, что результаты расчетов по предложенной зависимости (12) лучше согласуются с экспериментальными данными, чем по формулам Вальтера – ASTM (7) и Рейнольдса – Филонова (8). Точность расчетов по формулам (7) и (8) можно значительно повысить, если задать более узкий интервал исходных экспериментальных данных. Однако для практических целей, в частности при гидравлических расчетах трубопроводов, зачастую требуется определение значений кинематической вязкости во всем диапазоне возможных температур.

Определенная сложность описания вязкостно-температурных характеристик дизельных топлив на всем интервале температур одной зависимостью объясняется тем, что при снижении температуры топлива ниже его температуры помутнения в нем образуются микрокристаллы *n*-парафиновых углеводородов [5]. При этом происходит резкое, скачкообразное повышение значений параметра кинематической вязкости.

Следует отметить, что согласно требованиям ГОСТ Р 52368-2005 показатель температуры помутнения определя-

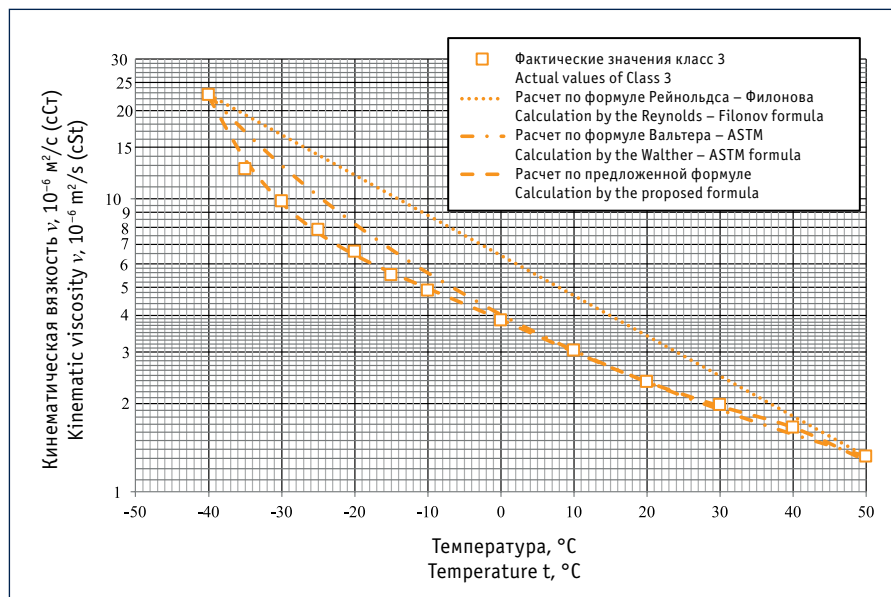


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных вязкостно-температурных характеристик дизельного топлива EBPO класс 3

Fig. 3. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Class 3 diesel fluid’s viscosity-temperature characteristics

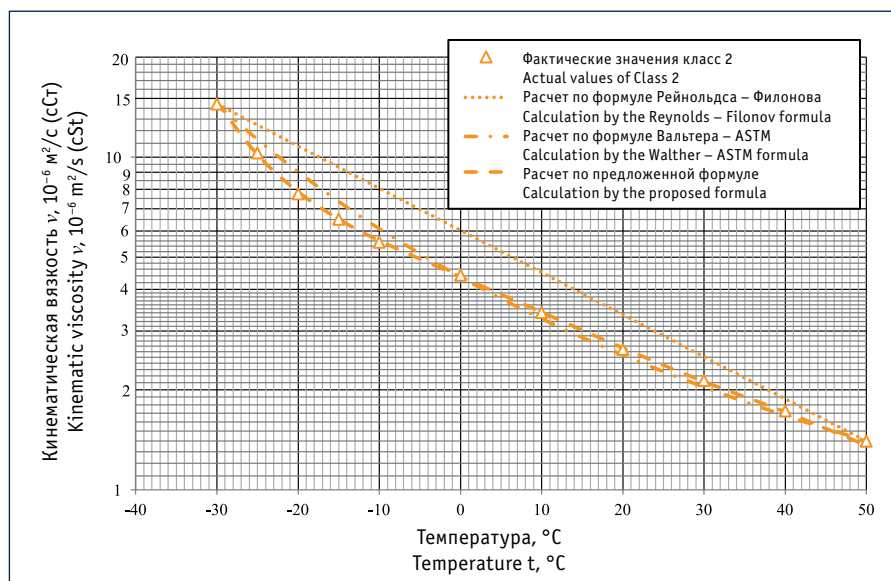


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных вязкостно-температурных характеристик дизельного топлива EBPO класс 2

Fig. 4. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Class 2 diesel fluid’s viscosity-temperature characteristics

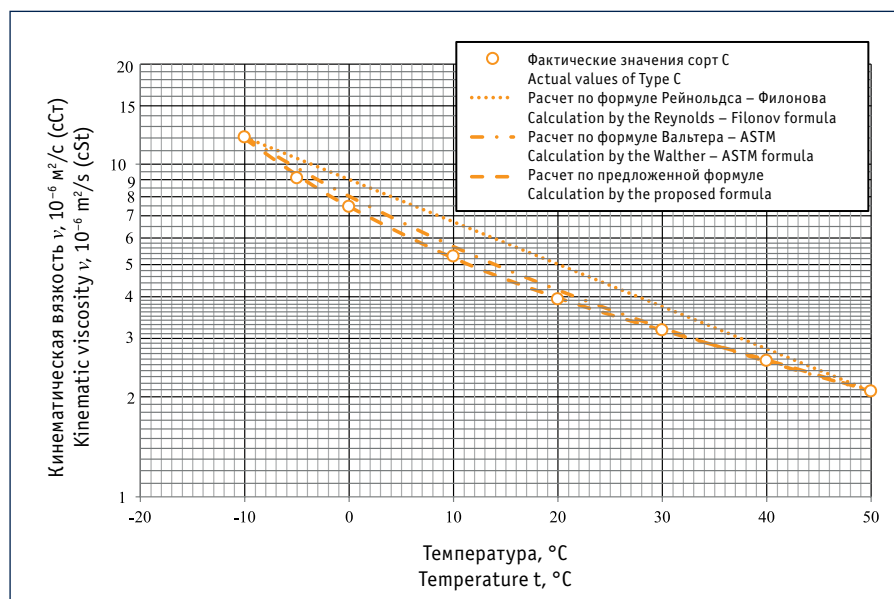


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных данных вязкостно-температурных характеристик дизельного топлива ЕВРО сорт С

Fig. 5. Comparison of experimental and calculated values of a EURO Type C diesel fluid's viscosity-temperature characteristics

ется только у топлив для холодного и арктического климата (обозначаются как классы). Температура застывания вообще отсутствует в требованиях, хотя является важным показателем такого эксплуатационного свойства, как прокачиваемость [5, 8].

Применительно к задачам трубопроводного транспорта температура за-

стывания дизельного топлива может быть использована как ориентировочный показатель минимально предельной температуры, при которой возможно проведение перекачки. Однако следует учитывать, что проводить перекачку по трубопроводам дизельного топлива ниже его температуры помутнения длительное время

не рекомендуется, так как это может привести к образованию отложений парафина на стенках трубопровода. Наличие скоплений отложений парафина приводит к уменьшению величины внутреннего сечения трубопровода, повышению гидравлических сопротивлений и, следовательно, к увеличению энергетических затрат на проведение перекачки.

Таким образом, используя зависимость (12) или ее запись в виде (13) с соответствующими коэффициентами из табл. 4, можно определять значения кинематической вязкости дизельных топлив ЕВРО классов 4, 3, 2 и сорта С, выпускаемых по ГОСТ Р 52368-2005, при диапазонах температур, указанных в табл. 5–8.

При наличии массива экспериментальных данных для других образцов дизельных топлив коэффициенты аппроксимации в формуле (12) могут быть найдены с использованием пакета прикладных программ Microsoft Office Excel.

Предложенный авторами подход для аналитического представления кинематической вязкости в зависимости от температуры является одним из возможных. Окончательный выбор используемых формул зависит от поставленной задачи и исполнителей.

Литература:

1. Лурье М.В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 456 с.
2. Марон В.И. Гидродинамика однофазных и многофазных потоков в трубопроводе. М.: МАКС Пресс, 2009. 344 с.
3. Коршак А.А., Нечвал А.М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. СПб.: Недра, 2008. 488 с.
4. ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009). Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. 28 с.
5. Гришин Н.Н., Серeda В.В. Энциклопедия химмотологии. М.: Изд-во «Перо», 2016. 960 с.
6. Агапкин В.М., Борисов С.Н., Кривошеин Б.Л. Справочное руководство по расчетам трубопроводов. М.: Недра, 1987. 191 с.
7. Данильченко И.Г., Голеницкий А.И., Мельников Д.И. Аналитическое представление характеристик нефтепродуктов для гидравлического расчета полевого магистрального трубопровода // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2008. Вып. 54. С. 510–521.
8. Сафонов А.С., Ушаков А.И., Гришин В.В. Химмотология горюче-смазочных материалов. СПб.: НПИКЦ, 2007. 488 с.

References:

1. Lurie M.V. Mathematical Modeling of Pipeline Transportation of Oil and Gas. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2012, 456 pp. (In Russian)
2. Maron V.I. Hydrodynamics Single-Phase and Multiphase Flows Through a Pipeline. Moscow, MAKS press, 2009, 344 pp. (In Russian)
3. Korshak A.A., Nechval A.M. Gas and Oil Pipeline Design and Operation. St. Petersburg, Nedra publ., 2008, 488 pp. (In Russian)
4. GOST R 52368-2005 (EN 590:2009) EURO Diesel Fuel. Specification. Moscow, Standartinform, 2005, 28 pp. (In Russian)
5. Grishin N.N., Sereda V.V. Encyclopedia of Himmotology. Moscow, Pero Publ., 2016, 960 pp. (In Russian)
6. Agapkin V.M., Borisov S.N., Krivoshein B.L. Reference Manual on Pipeline Calculation. Moscow, Nedra publ., 1987, 191 pp. (In Russian)
7. Danil'chenko I.G., Golenitski A.I., Mel'nikov D.I. Analytical Characterization of Oil Products for Hydraulic Calculation of a Field Main Pipeline. In: Proceedings of 25th State Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 2008, Issue 54, P. 510–521. (In Russian)
8. Safonov A.S., Ushakov A.I., Grishin V.V. Himmotology of Fuel and Lubricating Materials. St. Petersburg, NPIKC publ., 2007, 488 pp. (In Russian)