

ЕНЕРГЕТИКА ТА НОВІ ЕНЕРГОГЕНЕРУЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.43:621.4:621.1.01

В.О. Мазін

РОЗРАХУНОК ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИПУСКНОГО ГАЗУ ДИЗЕЛЬНОГО КОМБІНОВАНОГО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

The purpose of research is to determine the coefficients of dynamic and kinematics viscosity, thermal conductivity of the exhaust gas of diesel CICE for typical states of exhaust systems. The research application methods are based on theories of gas mixtures using the Sutherland reduction formulas, combustion of liquid hydrocarbon fuels at the rate of stoichiometric proportions. Research results are quantities of viscosity and thermal conductivity coefficients of the exhaust gas by stoichiometric composition mixture with typical conditions for exhaust system of diesel CICE, dependencies of viscosity and thermal conductivity of exhaust gas from the combustible mixture composition by atmospheric pressure and temperature. The established performance error does not exceed 0,5 %. Our conclusions conform with classical ideas on studied properties of gases: viscosity and thermal conductivity of combustion products of the diesel CICE increase with rise of temperature and air content, as well as with the intense viscosity changes compared to thermal conductivity with the air content.

Вступ

У теорії комбінованих двигунів внутрішнього згорання (КДВЗ) робоче тіло (яким може бути і випускний газ) представляють сумішшю газів: продуктів згорання суміші стехіометричного складу і надлишкового повітря, за їх даними визначають характеристики суміші. Характеристики в'язкості і теплопровідності продуктів згорання вуглеводних палив КДВЗ, у т.ч. випускного газу, потрібні при дослідженні теплових і газодинамічних процесів у циліндрі й випускній системі, при визначенні коефіцієнта тепловіддачі випускного колектора. У літературі такі дані відсутні. У загальному випадку випускний газ є сумішшю вуглекислого газу (CO_2), окису вуглецю (CO), пари води (H_2O), надлишкового і продувного повітря (air), азоту (N_2) і його оксидів (NO_x). Характеристики в'язкості й теплопровідності цих газів є в багатьох джерелах [1–16]; у мережі Інтернет пропонуються програми розрахунку [17–19]. Однак бази літературних даних різняться й область можливих станів у випускних системах КДВЗ (CO і H_2O особливо) покривають частково; програми Інтернету апроксимують дані з літератури, вірогідність результатів розрахунку за ними сумнівна: від даних добре вивченого повітря вони відрізняються значно. За теорією газових сумішей характеристики в'язкості та теплопровідності випускного газу розраховані, але область їх визначення повторює літературну: також вузька і не відповідає можливим станам у випускних системах. Крім того, використання таблиць в обчисленнях з ЕОМ вимагає спеціальних алгоритмів.

Постановка задачі

Метою роботи є визначення коефіцієнтів динамічної та кінематичної в'язкості, теплопровідності випускного газу дизельного КДВЗ при характерних для випускних систем станів. Для цього розв'язувалися такі задачі: 1) розроблення розрахункової методики; 2) визначення залежності теплофізичних характеристик випускного газу дизельного КДВЗ від його складу; 3) визначення залежності теплофізичних характеристик випускного газу дизельного КДВЗ стехіометричного складу від тиску і температури.

Методика дослідження

Характеристики в'язкості й теплопровідності продуктів згорання за певних умов можливо розрахувати за теорією газових сумішей [11], а привести їх до довільного стану – за формулами Сутерленда [12]. Аналіз довідкової літератури показав, що ці характеристики доцільно розраховувати за тиску $p = 0,1$ МПа і температури $T = 273$ К – будемо називати цей стан початковим і позначати індексом “i”, дані за стандартних умов $p = 0,101325$ МПа, $T = 273,15$ К при цьому встановлюються інтерполяцією.

Визначення часток складників випускного газу базується на розрахунку кількості продуктів згорання КДВЗ за стехіометричними співвідношеннями [20, 21]. У дійсній роботі розглянутий цикл Diesel, для вихідних даних перевага віддана офіційним джерелам [13, 14], багаторазово перевірено на вірогідність.

Склад дизельного палива (масові частки складових): вуглець $C = 0,870$, водень $H = 0,126$, кисень $O = 0,004$ (кг/кг). Теоретично необхідні кількість і маса повітря для згоряння становлять

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \frac{\text{кмоль}}{\text{кг}};$$

$$\ell_0 = \mu_a L_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} C + 8H - O \right), \frac{\text{кг}}{\text{кг}};$$

де $\mu_a = 28,96 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ – молекулярна маса повітря [11].

Коефіцієнт надлишку повітря дійсного циклу ДВЗ визначається як

$$\alpha = \frac{L}{L_0} = \frac{\ell}{\ell_0} = \frac{G}{g_e N_e \ell_0},$$

де L, ℓ, G – дійсні кількість, маса і масова витрата повітря, N_e, g_e – ефективні потужність і питома витрата палива двигуна.

Кількість продуктів повного і досконалого згоряння, що утворюються при згорянні 1 кг дизельного палива в повітрі надлишкової кількості, становить

$$M = (M_C + M_H + M_{N_0}) + M_\alpha = M_0 + M_\alpha,$$

де $M_C, M_H, M_{N_0}, M_\alpha$ – кількості складових продуктів згоряння: вуглекислого газу, пари води, азоту повітря, якби суміш була стехіометричного складу, і надлишкового повітря;

$M_0 = M_C + M_H + M_{N_0}$ – кількість продуктів згоряння суміші стехіометричного складу.

Кількості складників і в цілому продуктів згоряння (кмоль/кг) становлять

$$M_C = \frac{C}{12}, M_H = \frac{H}{2}, M_{N_0} = 0,792 L_0,$$

$$M_0 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,792 L_0; M_\alpha = (\alpha - 1) L_0,$$

$$M = M_0 + M_\alpha = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,792 L_0 + (\alpha - 1) L_0.$$

Об'ємні частки вуглекислого газу, пари води, азоту повітря, якби суміш була стехіометричного складу, продуктів згоряння суміші стехіометричного складу і надлишкового повітря становлять:

$$r_C = \frac{M_C}{M}, r_H = \frac{M_H}{M}, r_{N_0} = \frac{M_{N_0}}{M},$$

$$r_0 = \frac{M_0}{M}, r_\alpha = \frac{M_\alpha}{M}.$$

Баланс об'ємних часток (співвідношення для перевірки) визначається як

$$\sum r = r_C + r_H + r_{N_0} + r_\alpha = 1; r_0 = r_C + r_H + r_{N_0},$$

$$r_0 + r_\alpha = 1.$$

Щільність, молекулярна маса і газова стала газової суміші довільного складу (стехіометричного у т.ч.) визначаються за відповідними даними складників [11]:

$$\rho = \rho_C \cdot r_C + \rho_H \cdot r_H + \rho_{N_0} \cdot r_{N_0} + \rho_\alpha \cdot r_\alpha,$$

$$\mu = \mu_C \cdot r_C + \mu_H \cdot r_H + \mu_{N_0} \cdot r_{N_0} + \mu_\alpha \cdot r_\alpha, R = \frac{\mu R}{\mu};$$

де $\mu R = 8314,51 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$ – універсальна газова стала [22].

Масові частки складових продуктів згоряння визначаються такими співвідношеннями:

$$g_C = \frac{\rho_C}{\rho} r_C, g_H = \frac{\rho_H}{\rho} r_H, g_{N_0} = \frac{\rho_{N_0}}{\rho} r_{N_0}, g_\alpha = \frac{\rho_\alpha}{\rho} r_\alpha.$$

Масова частка продуктів згоряння суміші стехіометричного складу обчислюється як

$$g_0 = g_C + g_H + g_{N_0}.$$

Баланс масових часток (співвідношення для перевірки):

$$\sum g = g_C + g_H + g_{N_0} + g_\alpha = 1, \sum g = g_0 + g_\alpha.$$

У теорії КДВЗ масову частку продуктів згоряння суміші стехіометричного складу називають ще коефіцієнтом складу: для маси робочого тіла m з масою m_0 продуктів згоряння суміші стехіометричного складу $g_0 = \frac{m_0}{m}$;

$g_\alpha = 1 - g_0$ – масова частка надлишкового повітря. Після завершення тепловиділення аж до початку продувки склад робочого тіла майже не змінюється, а коефіцієнт складу досягає гранично можливого значення:

$$g_0 = \frac{1 + \ell_0}{1 + \alpha \ell_0}.$$

Випускний газ від продуктів згоряння на момент кінця тепловиділення складом відрізняється незначно, часткою продувного повітря зневажають.

Щільність газу і газової суміші є функцією стану, за узагальненим рівнянням стану

$$\rho = \rho_i \frac{T_i p}{p_i T} = \frac{273}{0,1} \rho_i \frac{p}{T},$$

де ρ_i – щільність за початкових умов.

Для перерахування коефіцієнтів в'язкості й теплопровідності газу при початковому стані до інших станів використовуються формули Сутерленда [12], модифіковані врахуванням залежності від тиску при мінімальній середньоінтегральній похибці в області визначення. Для випускного газу передбачені варіанти розрахунку:

за даними складників і напряму за його власними даними:

$$\eta = \eta_i \frac{273 + Su}{T + Su} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{p}{0,1} \right)^{\frac{1,35p}{1000}},$$

показники ступеня для вуглекислого газу $\frac{3}{2} + 0,067 \frac{273}{T}$ і пари води $\frac{2,1p}{1000}$,

$$\nu = \nu_i \frac{273 + Su}{T + Su} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{5}{2}} \cdot \frac{0,1}{p},$$

показник ступеня для вуглекислого газу: $\frac{5}{2} + 0,067 \frac{273}{T}$,

$$\lambda = \lambda_i \frac{273 + Su}{T + Su} \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \left[1 + \left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{82378}{p}} \right]^{0,011T}.$$

Молекулярна маса μ , питома газова стала R , щільність за початкових атмосферних умов ρ_i , коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості, теплопровідності η_i , ν_i , λ_i наведені в табл. 1; для води значення ρ_i , η_i , ν_i , λ_i – умовні: якби при цьому вода перебувала в пароподібному стані; встановлені ρ_i – за узагальненим рівнянням стану, η_i , ν_i , λ_i – екстраполяцією [11–14]. Такі умовності потрібні для одноманітності розрахункової методики: розрахунок від однакових початкових умов. Для продуктів згоряння дизельних КДВЗ при характерних складах ці характеристики розраховані за викладеною методикою.

У табл. 2 наведені числа Сутерленда для перерахування коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності складових і власне випускного газу до інших станів. Як орієнтири використані числа Su з літератури; вони однак не оптимальні: похибка перерахування в'язкості порівняно невисока, для теплопровідності вони не придатні. Виходячи з умови мінімальної середньоінтегральної похибки в області характерних станів випускного газу Err , ці числа роздільно для в'язкості Su_ν уточнені, для теплопровідності Su_λ встановлені. Вважалось: дійсна похибка дорівнює нулю в середині цієї області, тоді

Таблиця 1. Теплофізичні характеристики газів, що беруть участь у робочому процесі дизельного КДВЗ, за тиску $p = 0,1$ МПа і температури $T = 273$ К

Газ	Властивість					
	ρ_i , кг/м ³	μ , кг/кмоль	R , Дж/(кг·К)	$\eta_i \cdot 10^6$, Па·с	$\nu_i \cdot 10^6$, м ² /с	$\lambda_i \cdot 10^6$, Вт/(м·К)
CO ₂	1,9519	44,011	188,92	13,65	6,904	14,675
H ₂ O _{пар}	0,8059	18,016	461,51	8,0	9,936	15,9
N ₂	1,2348	28,016	296,78	16,581	13,297	23,875
Повітря (α)	1,2767	28,96	287,10	17,11	13,226	24,14
ПрСг _{$\alpha = 1$}	1,282	29,013	286,575	14,743	11,399	20,446
ПрСг _{$\alpha = 1,25$}	1,281	29,003	286,675	15,141	11,706	21,057
ПрСг _{$\alpha = 1,5$}	1,280	28,996	286,744	15,424	11,926	21,495
ПрСг _{$\alpha = 1,75$}	1,280	28,991	286,793	15,636	12,089	21,824
ПрСг _{$\alpha = 2$}	1,279	28,988	286,831	15,800	12,217	22,080

Примітка. ПрСг _{$\alpha = 1$} , ПрСг _{$\alpha > 1$} – продукти згоряння сумішей стехіометричного складу і з надлишком повітря.

Таблиця 2. Числа Сутерленда [12, 15]

Su	Газ										
	CO ₂	CO	H ₂ O	O ₂	N ₂	Air	ПрСГ _{α=1}	ПрСГ _{α=1,25}	ПрСГ _{α=1,5}	ПрСГ _{α=1,75}	ПрСГ _{α=2}
Su	213	102	673	138– 135	107– 104,7	122– 111	194,4– 186,9	180,6– 172,5	171,2– 162,6	164,4– 155,5	159,3– 150,1
Su _v	220	97	1206	124	106,7	126	255,588	228,491	212,101	200,231	191,237
Su _λ	1111	225	9241	234	207	208	1402,2	1174,9	1020,3	908,28	823,43

Примітка. Su, Su_v, Su_λ – числа Сутерленда з літератури за умови мінімальної середньоінтегральної похибки для коефіцієнтів в'язкості й теплопровідності.

Err ≤ 0,3–0,5 %. Для продуктів згоряння числа Сутерленда розраховані за теорією газових сумішей:

$$Su = Su_C \cdot r_C + Su_H \cdot r_H + Su_N \cdot r_{N0} + Su_\alpha \cdot r_\alpha$$

За теорією газових сумішей коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості, теплопровідності продуктів згоряння [12] становлять

$$\eta = \frac{1}{\frac{g_C}{\eta_C} + \frac{g_H}{\eta_H} + \frac{g_{N0}}{\eta_N} + \frac{g_\alpha}{\eta_\alpha}}, \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\nu = \frac{1}{\frac{r_C}{\nu_C} + \frac{r_H}{\nu_H} + \frac{r_{N0}}{\nu_N} + \frac{r_\alpha}{\nu_\alpha}}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}};$$

$$\lambda = \frac{1}{\frac{g_C}{\lambda_C} + \frac{g_H}{\lambda_H} + \frac{g_{N0}}{\lambda_N} + \frac{g_\alpha}{\lambda_\alpha}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Результати дослідження

Розраховано об'ємний і масовий склад продуктів згоряння дизельного палива за характерних значень коефіцієнта надлишку повітря (табл. 3).

За викладеною методикою розраховані характеристики в'язкості та теплопровідності випускного газу за конкретних умов, їх залежність від складу зрозуміла з табл. 1 і рис. 1.

η × 10⁶, Па·с;
ν × 10⁶, м²/с;
λ × 10³, Вт/(м·К)

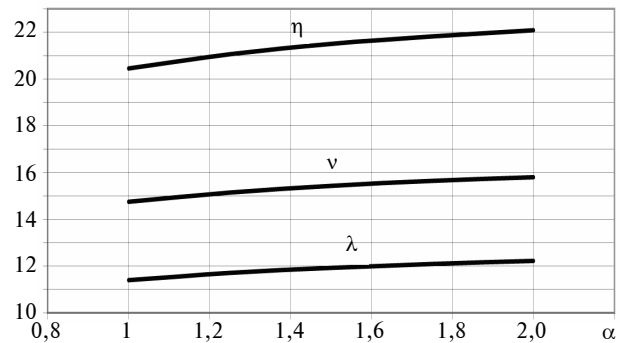


Рис. 1. Залежність в'язкості й теплопровідності випускного газу дизельного КДВЗ від складу пальної суміші при p = 0,1 МПа, T = 273 К

Результати розрахунку коефіцієнтів динамічної та кінематичної в'язкості, теплопровідності складових і власне випускного газу як продуктів згоряння суміші стехіометричного складу за тиску p = 0,1 МПа в інтервалі температур, характерному для випускних систем КДВЗ, наведені в табл. 4, 5. Похибка не перевищує 0,5 %, що встановлено зіставленням з даними [13, 14] і з результатами розрахунку за теорією газових сумішей.

Результати розрахунку коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності продуктів згоряння суміші стехіометричного складу за тиску

Таблиця 3. Частки складових продуктів згоряння дизельного палива за різного складу суміші

α	CO ₂		H ₂ O		N ₀		Air		ПрСГ	
	r _C	g _C	r _H	g _H	r _{N0}	g _{N0}	r _α	g _α	r ₀	g ₀
1	0,137	0,208	0,119	0,074	0,745	0,718	0	0	1	1
1,25	0,111	0,169	0,096	0,06	0,603	0,582	0,19	0,19	0,81	0,81
1,5	0,093	0,142	0,081	0,05	0,507	0,489	0,32	0,319	0,68	0,681
1,75	0,08	0,122	0,07	0,043	0,437	0,422	0,414	0,413	0,586	0,587
2	0,07	0,107	0,061	0,038	0,384	0,371	0,485	0,484	0,515	0,516

Таблиця 4. Коефіцієнти динамічної й кінематичної в'язкості газів

T, K	$\eta \times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$					$\nu \times 10^6, \text{м}^2/\text{с}$				
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Air	ПрСг _{$\alpha=1$}	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Air	ПрСг _{$\alpha=1$}
500	23,166	17,191	25,721	27,031	24,383	21,460	39,104	37,778	38,269	34,515
600	26,739	21,346	29,027	30,639	27,930	29,724	58,268	51,160	52,052	47,440
700	30,033	25,488	32,044	33,935	31,177	38,949	81,170	65,890	67,260	61,782
800	33,096	29,588	34,832	36,983	34,189	49,053	107,688	81,856	83,774	77,419
900	35,965	33,629	37,434	39,829	36,999	59,969	137,696	98,968	101,497	94,253
1000	38,670	37,602	39,882	42,505	39,644	71,644	171,068	117,154	120,353	112,206
1100	41,234	41,500	42,199	45,038	42,146	84,033	207,680	136,355	140,277	131,213
1200	43,674	45,320	44,402	47,447	44,525	97,097	247,418	156,518	161,215	151,217
1300	46,005	49,062	46,507	49,748	46,797	110,804	290,169	177,601	183,119	172,173
1400	48,241	52,727	48,526	51,954	48,973	125,126	335,829	199,563	205,949	194,037
1500	50,390	56,315	50,467	54,075	51,065	140,036	384,303	222,372	229,669	216,774

Таблиця 5. Коефіцієнт теплопровідності газів
 $\lambda \times 10^3, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

T, K	CO ₂	H ₂ O	N ₂	Air	ПрСг. $\alpha = 1$
500	31,249	38,492	40,177	40,651	37,808
600	38,677	50,085	46,270	46,823	44,699
700	46,047	62,480	51,878	52,505	51,178
800	53,315	75,575	57,089	57,785	57,291
900	60,454	89,290	61,967	62,729	63,078
1000	67,450	103,556	66,564	67,387	68,578
1100	74,297	118,317	70,918	71,800	73,822
1200	80,992	133,521	75,062	75,999	78,837
1300	87,537	149,125	79,021	80,012	83,646
1400	93,933	165,093	82,817	83,858	88,269
1500	100,185	181,389	86,466	87,557	92,725

$\eta \times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с};$
 $\nu \times 10^6, \text{м}^2/\text{с};$
 $\lambda \times 10^3, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$

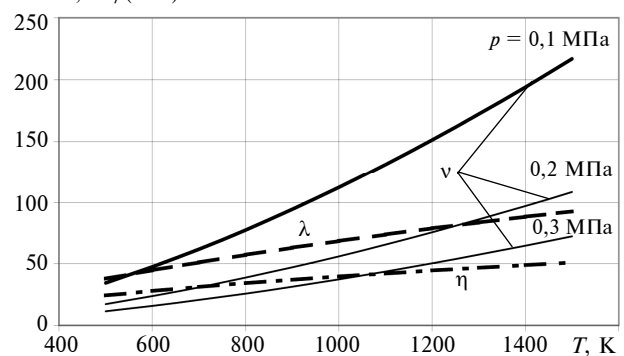


Рис. 2. Залежність теплофізичних характеристик продуктів згоряння суміші стехіометричного складу від тиску і температури

Таблиця 6. Коефіцієнти динамічної й кінематичної в'язкості, теплопровідності продуктів згоряння суміші стехіометричного складу

T, K	$\eta \times 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$			$\nu \times 10^6, \text{м}^2/\text{с}$			$\lambda \times 10^3, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$		
	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа	0,1 МПа	0,2 МПа	0,3 МПа
500	24,383	24,388	24,394	34,515	17,258	11,505	37,808	37,939	38,104
600	27,930	27,936	27,943	47,440	23,72	15,813	44,699	44,843	45,012
700	31,177	31,186	31,194	61,782	30,891	20,594	51,178	51,333	51,506
800	34,189	34,196	34,205	77,419	38,709	25,806	57,291	57,455	57,630
900	36,999	37,007	37,017	94,253	47,127	31,418	63,078	63,251	63,428
1000	39,644	39,652	39,662	112,206	56,103	37,402	68,578	68,759	68,938
1100	42,146	42,154	42,166	131,213	65,606	43,738	73,822	74,009	74,190
1200	44,525	44,534	44,546	151,217	75,609	50,406	78,837	79,031	79,212
1300	46,797	46,806	46,818	172,173	86,086	57,391	83,646	83,847	84,028
1400	48,973	48,983	48,996	194,037	97,018	64,679	88,269	88,476	88,659
1500	51,065	51,075	51,089	216,774	108,387	72,258	92,725	92,938	93,120

$p = 0,1-0,3$ МПа в інтервалі температур, характерному для випускних систем КДВЗ, наведені в табл. 6; графіки відповідних залежностей показані на рис. 2, залежність коефіцієнтів динамічної в'язкості та теплопровідності від тиску неістотна і на рисунку не проглядається. Характер відповідних залежностей для складових продуктів згоряння і продуктів згоряння сумішей з надлишком повітря аналогічний.

Наукову новизну роботи становлять: 1) методика розрахунку коефіцієнтів в'язкості і теплопровідності продуктів згоряння КДВЗ; 2) бази даних коефіцієнтів в'язкості і теплопровідності випускного газу дизельних КДВЗ; 3) закономірності зміни в'язкості та теплопровідності випускного газу зі складом і станом; 4) модифіковані формули Сутерленда, що враховують залежність в'язкості й теплопровідності газу від тиску і забезпечують мінімальну похибку відповідних коефіцієнтів; 5) уточнені та встановлені роздільно для в'язкості й теплопровідності числа Сутерленда Su_v, Su_λ .

Практична цінність результатів: запропонована розрахункова методика, встановлені бази даних та закономірності зміни в'язкості й теплопровідності випускного газу затребувані й матимуть застосування в теплових та газодина-

мічних дослідженнях, при проектуванні систем КДВЗ й інших теплових машин.

Висновки

1. В'язкість і теплопровідність продуктів згоряння зі збільшенням змісту повітря зростають, в'язкість зростає більш інтенсивно.

2. В'язкість і теплопровідність продуктів згоряння з температурою зростають, що відповідає класичним уявленням про ці властивості газів.

3. Для випускного газу дизельного КДВЗ залежність коефіцієнтів динамічної в'язкості та теплопровідності від тиску прямо пропорційна і слабка; коефіцієнт кінематичної в'язкості за тиском змінюється обернено пропорційно.

4. Числа Сутерленда Su з літератури, виданої до 2012 р., орієнтовані на обчислення коефіцієнтів в'язкості, не оптимальні і не забезпечують мінімальної похибки, вимагають уточнення, для теплопровідності їх варто встановлювати. Подальше зниження похибки можливе залученням чисел Su для 2-3 температурних інтервалів, це є перспективним і в особливо відповідальних дослідженнях забезпечить її границі 0,1–0,25 %.

1. Дубовкин Н.Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 288 с.
2. Грабов Л.Н., Шматок А.И. Производство альтернативного биодизельного топлива и перспективы его развития // Промышленная теплотехника. – К.: Ин-т техн. теплофизики НАНУ. – 2008. – Вып. 30, № 1. – С. 55–59.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 321 с.
4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
5. Кривандин В.А., Арутюнов В.А., Мاستрюков Б.С. Металлургическая теплотехника. В 2 т. – М.: Metallurgia, 1986. – Т. 1. Теоретические основы. – 424 с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубовского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
7. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. – М.: Энергия, 1975. – 80 с.
8. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 400 с.
9. Перельман В.И. Краткий справочник химика. – М.: Госхимиздат, 1963. – 264 с.
10. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. – М.; Л.: Химия, 1966. – С. 352–355.
11. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. школа, 1980. – 469 с.
12. Эстеркин Р.И., Иссерлин А.С., Певзнер М.И. Теплотехнические измерения при сжигании газового и жидкого топлива: Справ. руководство. – Л.: Недра, 1981. – 424 с.
13. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
14. Теплопроводность жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 470 с.
15. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей: Справ. руководство. – М.: Гос. из-во физ.-мат. лит.-ры, 1959. – 375 с.
16. Бакулин В.Н., Брещенко Е.М. Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: Справочник. – М.: ИД МЭИ, 2009. – 614 с.

17. *Александров А.А., Орлов К.А., Очков В.Ф.* Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: Интернет-справочник. – М.: ИД МЭИ. 2009. – Режим доступа: <http://twf.mpei.ac.ru/rbtp/DV/>
18. <http://twf.mpei.ac.ru/rbtp/Diag5.xmcd>
19. *Thermophysical Properties of Fluid Systems* [Online]. Available: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>
20. *Двигатели* внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
21. *Дьяченко В.Г.* Теория двигателей внутреннего сгорания. – Харьков: ХНАДУ, 2009. – 500 с.
22. *Политехнический словарь* / А.Ю. Ишлинский. – М.: Сов. энциклопедия, 1989. – 656 с.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
29 грудня 2012 року