

О. М. Кондратенко, К. Р. Умеренкова, А. М. Левтеров, О. П. Строков, В. Ю. Колосков

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЬТЕРНАТИВНИХ МОТОРНИХ ПАЛИВ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОЇ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ТЕОРІЇ ЗБУРЕНЬ. ЧАСТИНА 2

У дослідженні, метою якого було вдосконалення математичного апарату на основі модифікованої термодинамічної теорії збурень для описання теплофізичних характеристик альтернативних моторних палив зі сферичною конфігурацією взаємодіючих структурних елементів та довільного агрегатного стану, послідовно виконано побудову формальної схеми модифікованої теорії збурень, надано описання основних характеристик модельної системи, описано параметри потенціалів взаємодії компонентів альтернативного палива, отримано розрахунком теплофізичні властивості компонентів альтернативного палива, здійснено розрахунки термодинамічних властивостей компонентів альтернативного палива, проаналізовано та проілюстровано у виді ізотерм діаграм фазової рівноваги та таблиць даних із результатами розрахунку термодинамічних характеристик альтернативного палива та їх аналіз. Об'єктом дослідження є теплофізичні характеристики традиційних, альтернативних та сумішевих моторних палив, що перебувають у рідинному чи газоподібному агрегатному стані. Предметом дослідження є математичний апарат на основі модифікованої теорії збурень для описання теплофізичних характеристик моторних палив. Наукова новизна результатів дослідження полягає в тому, що вдосконалено математичний апарат на основі модифікованої термодинамічної теорії збурень для вичерпного описання всіх теплофізичних характеристик моторних палив будь-якого генезису, тобто традиційних, альтернативних та сумішевих, які перебувають як у рідинному, так і в газоподібному агрегатному стані, у частині зменшення часу розрахунку та зниження похибки отримання теплофізичних характеристик порівняно з довідниковими та експериментальними даними. Практичне значення результатів дослідження, полягає у тому, що вдосконалений математичний апарат придатний для надання точної інформації до складу набору вихідних даних у дослідженнях щодо виробництва, зберігання, перевезення, дистрибуції, використання моторних палив будь-якого генезису, які перебувають у різних агрегатних станах, а також прогнозування перебігу та результатів процесів забруднення атмосфери газоподібними продуктами повного й неповного горіння компонентів палив у камерах згоряння теплових машин різного типу.

Ключові слова: теплофізичні властивості; традиційні моторні палива; альтернативні моторні палива; математична модель; технології захисту навколишнього середовища; екологічна безпека; енергоустановки; поршневі двигуни внутрішнього згоряння.

Актуальність та постановка проблеми дослідження, мета, проблема, об'єкт, предмет та методи дослідження викладені у передній, першій, частині дослідження.

Задачами дослідження є такі:

1. Побудова формальної схеми модифікованої теорії збурень.
2. Визначення основних характеристик модельної системи.
3. Визначення параметрів потенціалів взаємодії компонентів альтернативного палива.
4. Визначення теплофізичних властивостей компонентів альтернативного палива.
5. Визначення методики розрахунку термодинамічних властивостей компонентів альтернативного палива.
6. Отримання результатів розрахунку термодинамічних характеристик альтернативного палива та їх аналіз.

У цій частині дослідження наведено результати розв'язання задач №№ 4–6. Результати розв'язання задач №№ 1–3 викладені у попередній частині дослідження.

Визначення теплофізичних властивостей компонентів альтернативного палива

Застосуємо викладену вище модифіковану схему теорії збурень у її першому порядку (МТЗ-1) для опису p , D , T – співвідношень і рівноваг рідина-пара компонентів АП. Співвідношення між параметрами стану T^* , ρ^* , p^* ЛД-системи та температурою, масовою щільністю та тиском (T , D , p) для компонента з молярною масою M і параметрами ε , σ мають вигляд:

$$\begin{cases} T^* = kT/\varepsilon = T/E, \\ \rho^* = \rho\sigma^3 = D/\tilde{D}, \\ p^* = p\sigma^3/\varepsilon = p/\tilde{P}, \end{cases} \quad (1)$$

де E , \tilde{D} , \tilde{P} – задані рівняннями (21), (22) частини 1 дослідження.

Залежності тиску та хімічного потенціалу речовин від щільності та температури мають вигляд

$$p(D, T)/\tilde{P} = \frac{TD}{E\tilde{D}} \left(1 + 2\eta \frac{2-\eta}{(1-\eta)^3} \right) + \left(\frac{D}{\tilde{D}} \right)^2 \left[A_0 + 2A_1 \left(\frac{D}{\tilde{D}} \right) + 3A_2 \left(\frac{D}{\tilde{D}} \right)^2 + 4A_3 \left(\frac{D}{\tilde{D}} \right)^3 \right], \quad (2)$$

$$\beta\mu(D,T) = \ln\left(\frac{D}{\tilde{D}}\right) + \eta \frac{8-9\eta+3\eta^2}{(1-\eta)^3} + \frac{ED}{\tilde{D}T} \left[2A_0 + 3A_1\left(\frac{D}{\tilde{D}}\right) + 4A_2\left(\frac{D}{\tilde{D}}\right)^2 + 5A_3\left(\frac{D}{\tilde{D}}\right)^3 \right], \quad (3)$$

де $A_i(T) = a_{i0} + a_{i1}(E/T) + a_{i2}(E/T)^2 + a_{i3}(E/T)^3$;
 $\eta = 0,4177 D/\tilde{D}$; a_{ik} – коефіцієнти з табл. 1 частини 1 дослідження.

Щільності рідкої D_L та парової D_V фаз на лінії насичення визначаються з умов рівності тисків і хімічних потенціалів фаз

$$\begin{cases} p(D_L, T) - p(D_V, T) = 0, \\ \mu(D_L, T) - \mu(D_V, T) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

а щільність речовини $D(p, T)$ в однофазній області в термодинамічному стані p й T – з рівняння

$$p(D, T) - p = 0. \quad (5)$$

Залежності ортобаричних щільностей $D_L(T)$, $D_V(T)$, тиску насиченої пари $p_S(T) = p(D_L, T)$, щільностей $D(p, T)$ за ізобарами та ізотермами визначаються з розв'язання системи нелінійних рівнянь (1) та з рівняння (5).

Система рівнянь (4) для рівноваги рідина – пара вирішена чисельно для зазначених у табл. 3 частини 1 дослідження компонентів в інтервалах $T_r < T < T_c$. Отримані значення щільності рідкої фази деяких компонентів АП на лінії насичення наведені в [9–11]* з опорними експериментальними даними [14] для C_1, \dots, C_5 ; N_2 і з даними [23–28] для CO_2, N_2, C_1, C_2 та C_3 . Останні дані являють собою табличні результати, отримані за єдиним рівнянням стану на основі аналізу й узагальнення численних експериментальних даних.

*тут і далі збережено наскрізну для обох частин дослідження нумерацію джерел посилання.

Відхилення розрахункових значень D_L від даних [23–29] ($\delta_N = (D_{PAC} - D[N])/D$) і середні значення модулів цих відхилень $\bar{\delta} = \sum_{i=1}^N |\delta(T_i)|/N$ показують, що розрахункові значення щільності компонентів АП відтворюють експериментальні дані практично в межах звичайних похибок вимірів щільності (порядку 0,1 %) для наведених у таблиці температурних інтервалів.

Настільки незначні похибки визначення щільності компонентів АП отримані в найбільш важкій для опису області рідкого стану. Що стосується газоподібної фази (на лінії насичення, або ж під тиском, в однофазній області – у тому числі при реальних температурах АП) – то похибки розрахункового визначення щільності не перевищують похибки експериментальних методів.

Вільна енергія однокомпонентного флюїду в термодинамічному стані (ρ^*, T^*) з урахуванням членів другого порядку (МТЗ-2) має вигляд

$$\beta f = \beta f_0 + \rho^* I_1 / T^* + \rho^* I_2 / T^{*2}, \quad (6)$$

де вільна енергія системи нульового наближення та груповий інтеграл першого й другого порядків задані виразами (14)–(16) частини 1 дослідження. Інтеграл другого порядку виражається через групові інтеграли J_n , що включають інтеграли від багаточасткових функцій розподілу.

У кожному з раніше визначених інтервалів T^* значення I_2 із середньою похибкою 0,3 % представлені функцією

$$I_2 = \sum_{i=0}^3 b_i \rho^{*i} \sum_{j=0}^4 c_j / (T^*)^{j-1}. \quad (7)$$

Значення коефіцієнтів b_i, c_j наведені в табл. 1. Член другого порядку у вільній енергії (6) виявляється приблизно на порядок меншим, ніж $\beta f_1 = \kappa_1$.

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів b_i й c_j у виразі (7)

i, j	b_i	c_j при T^*	
		0,3...0,696	0,696...5,0
0	5,4564	-2,4035	0
1	-11,0780	3,4624	0,3613
2	9,9206	-1,3752	-1,3171
3	-3,3069	0,1938	1,7981
4	-	0	-0,6577

Тут та у подальшому форми $\kappa_1[n], \kappa_2[n]$ визначені за виразами:

$$\kappa_1[n] = \sum_{i,k=0}^3 n a_{ik} (\rho^*)^{i+1} / (T^*)^{k+1},$$

$$\kappa_2[n] = \sum_{i=0}^3 b_i (\rho^*)^{i+1} \sum_{j=0}^4 n c_j / (T^*)^{j+1},$$

де a_{ik} – коефіцієнти полінома I_1 (див. табл. 1 частини 1 дослідження).

Визначення методики розрахунку термодинамічних властивостей компонентів альтернативного палива

Розрахунки термодинамічних властивостей компонентів АП в однофазній області й на лініях рівноваги фаз виконані на базі даних про щільності D й D_L , отриманих з (4) і (5) (визначення щільності за схемою МТЗ-1 є першим етапом розрахунків). Наведемо вирази для основних властивостей, отриманих з урахуванням (6).

$$\text{Тиск } p = \tilde{P} T^* \rho^* z.$$

$$\text{Фактор стискуваності } z = 10^3 p / RTD,$$

$$z = 1 + 2\eta \frac{2-\eta}{(1-\eta)^3} + \kappa_1[i+1]. \quad (8)$$

Вільна енергія $F = RT(\beta f)$,

$$\beta f = \beta h_0 - s_0 - 1 - \ln z_N + \eta \frac{4-3\eta}{(1-\eta)^2} + \kappa_1[1] + \kappa_2[1]. \quad (9)$$

Ентропія $S = Rs(s = \beta u - \beta f)$,

$$s = s_0 + \ln z_N - \eta \frac{4-3\eta}{(1-\eta)^2} + \kappa_1[k] + \kappa_2[j]. \quad (10)$$

Ентальпія $H = RT(\beta h)$ ($\beta h = \beta u + z$),

$$\beta h = \beta h_0 + 2\eta \frac{2-\eta}{(1-\eta)^3} + \kappa_1[i+k+2] + \kappa_2[j+1]. \quad (11)$$

Енергія Гіббса $G = RT(\beta \mu)$ ($\mu = f + z/\beta$ – хімічний потенціал),

$$\beta \mu = \beta h_0 - s_0 - \ln z_N + \eta \frac{8-9\eta+3\eta^2}{(1-\eta)^3} + \kappa_1[i+2] + \kappa_2[1]. \quad (12)$$

Ізохорна теплоємність $C_v = Rc_v$,

$$c_v = c_{p0} - 1 - \kappa_1[k(k+1)] - \kappa_2[j(j+1)] \quad (13)$$

Ізобарна теплоємність $C_p = Rc_p$,

$$c_p = c_v + \rho^* T^* \beta_T^* \left\{ 1 + 2\eta \frac{2-\eta}{(1-\eta)^2} - \chi_1[(i+1)k] \right\}^2, \quad (14)$$

де $\eta = 0,4177\rho^*$, $\rho^* = D/\tilde{D}$, $T^* = T/E$, $p^* = p/\tilde{P}$.

У виразах (9)–(12) $z_N = 10^3 p_{st}/RTD$ – функція нормування на стандартний тиск $p_{st} = 0,101325$ МПа, а величини h_0, c_{p0}, s_0 – питомі (що припадають на 1 молекулу) ентальпія, ентропія та ізобарна теплоємність в ідеально-газовому стані.

При розгляді компонентів АП та їх сумішей використані вирази Пассата-Даннера для h_0, c_{p0}, s_0 :

$$\begin{cases} \beta h_0 = 4,1868 \left(\frac{A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + Et^4 + Ft^5}{R} \right) / RT + \beta h_0^0, \\ s_0 = 4,1868 \left(\frac{B \ln t + 2Ct + 3Dt^2/2 + 4Et^3/3 + 5Ft^4/4 + G}{R} \right) / R + s_0^0, \\ c_{p0} = 4,1868 \left(\frac{B + 2Ct + 3Dt^2 + 4Et^3 + 5Ft^4}{R} \right) / R, \end{cases} \quad (15)$$

де $t = 1,8T^*$, константи відліку $h_0^0 = s_0^0 = 0$, а необхідні посилання, параметри та області застосовності наведені в роботі [21]. Вирази (9)–(12) для основних термодинамічних характеристик перекладені на мову комп'ютерів і не містять підгінних параметрів або емпіричних кореляцій.

Проведемо чисельне дослідження моделі індивідуальної речовини (на прикладі азоту) для пере-

вірки теоретичних виразів, що описують рівновагу фаз. Система рівнянь (4) для рівноваги рідина-пара розв'язана чисельно в інтервалах $T_{tr} < T < T_c$. Отримані значення щільності рідкої фази уздовж лінії рівноваги порівнюються в табл. 4 з опорними експериментальними даними для N_2 , наявними в літературі [25]. Аналіз відхилень розрахункових значень D_L від даних [25] засвідчує, що розрахункові значення щільності азоту (табл. 2) відтворюють експериментальні дані практично в межах звичайних похибок вимірів щільності (порядку 0,1%). На рис. 1 наведені значення щільності азоту в газоподібному й рідкому станах у порівнянні з експериментальними даними [25]. Пунктирна лінія – розрахунки щільності азоту за формулами для ідеального газу.

Таблиця 2. Щільність рідкого азоту уздовж ліній рівноваги

T, K	D_L , кг/м ³ (розрахунок за методикою МТЗ)	D_L , кг/м ³ (експеримент [25])
70	838,29	837,73
75	816,95	816,15
80	793,68	793,04
85	768,97	768,81
90	743,04	743,51
95	715,92	716,83
100	687,53	688,20
105	657,64	656,76
110	623,88	621,11

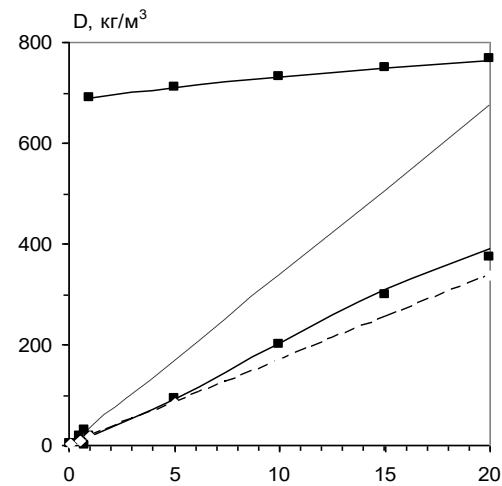


Рис. 1. Щільність азоту в газоподібному ($T = 200$ K) й рідкому станах ($T = 100$ K) в залежності від тиску p (МПа):

■ – експериментальні дані [25]
суцільна лінія – щільність при $T = 100$ K та 200 K (розрахунок),
пунктирна лінія – щільність при $T = 100$ K (ідеальний газ),
штрих-пунктирна лінія – щільність при $T = 200$ K (ідеальний газ)

У табл. 3 наведені розраховані відповідно до виразу (5) значення щільності азоту в однофазній

області. Частина даних належить до рідкої фази N₂ (відзначені зірочкою – *). Розрахункові значення термодинамічних властивостей (щільності) порівнюються з даними роботи [25], які є в основному результатом обробки й кореляції найбільш надійних експериментальних значень.

Таблиця 3. Порівняння експериментальних і розрахункових значень щільності азоту в однофазній області, кг/м³ (примітка: * – рідка фаза)

p, МПа	T, К					
	80		200		300	
	Розрах.	Експ. [25]	Розрах.	Експ. [25]	Розрах.	Експ. [25]
0,1013	4,42	4,37	1,71	1,69	1,14	1,12
0,5	794,84*	794,11*	8,52	8,25	5,62	5,62
1,0	796,37*	795,56*	17,21	17,23	11,26	11,25
1,5	797,87*	796,98*	26,09	26,12	16,90	16,89
2,0	799,35*	798,38*	35,17	35,21	22,56	22,53
2,5	800,82*	799,75*	44,43	44,47	28,22	28,18
3,0	802,26*	801,10*	53,89	53,92	33,89	33,82
3,5	803,69*	802,43*	63,55	63,54	39,56	39,46
4,0	805,09*	803,74*	73,40	73,34	45,24	45,10
4,5	806,48*	805,03*	83,44	83,30	50,91	50,91
5,0	807,86*	806,29*	93,68	93,42	56,59	56,73

Розрахунки ізобарної теплоємності виконані з (14) уздовж лінії рівноваги рідина-пара від потрійної точки до критичної точки й представлені на рис. 2. У важливій для розрахунків області зрідженого стану азоту від потрійної точки T_{tr} = 63,15 К до точки кипіння T_b = 77,35 К розбіжності в експериментальних даних [25] й [30] мають більші значення. Також видно, що наближення до ідеального газу C_p⁰ для теплоємності є грубим і при низьких температурах дає приблизно вдвічі заниженні значення C_p та не описує спостережувані температурні залежності. На рис. 3 і 4 зображені температурні залежності теплоємності для ізобар 5 і 10 МПа. Особливості залежностей C_p(T) виражені максимумами теплоємності у фазовій площині (T, P) при наближенні до колокритичної точки (на рис. 3 у точці T_c = 126,2 К, p_c = 3,40 МПа C_p(T_c, p_c) = ∞).

Ентальпія й ентропія азоту розраховані в однофазній області й уздовж ліній кипіння й конденсації (10), (11). У табл. 4 наведені розрахункові значення щільності, ентальпії й ентропії для різних значень тисків і температур. При порівнянні з експериментальними даними [25] до розрахункових значень H додана теплота сублімації азоту h₀⁰ = 247,6 кДж/кг при T = 0 К, оскільки для ідеально-газової ентальпії, використовуваної в [25], прийнята ненульова константа відліку.

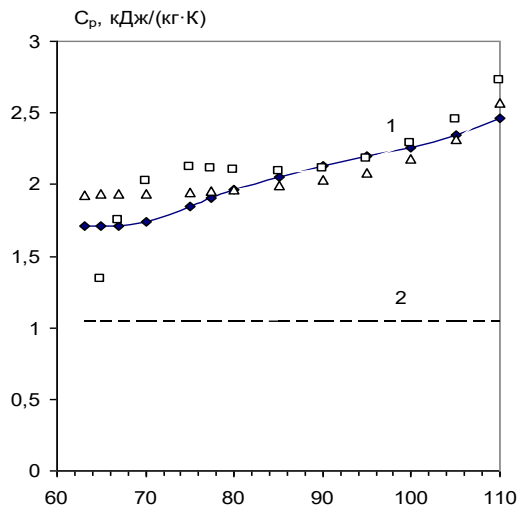


Рис. 2. Теплоємність C_p рідкого азоту на лінії рівноваги рідина-пара в залежності від температури T (К):

1 – розрахунок за схемою МТЗ;
2 – ідеальний газ (C_p = 1,0388 кДж/(кг·К));
Δ, □ – експериментальні дані [25], [30], суцільна лінія – теплоємність на лінії рівноваги (розрахунок), пунктирна лінія – теплоємність (ідеальний газ)

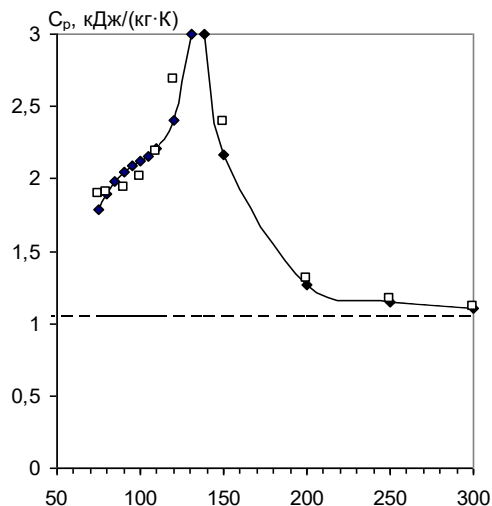


Рис. 3. Теплоємність C_p азоту при тиску p = 5 МПа в залежності від температури T (К):

□ – експериментальні дані [25]
суцільна лінія – теплоємність при p = 5 МПа для рідинної та газоподібної фази (розрахунок), пунктирна лінія – теплоємність (ідеальний газ)

Відхилення розрахункових значень H и S уздовж ліній кипіння і конденсації від значень експериментальних даних [25] ($\delta = (H^{\text{розрах}}/H^{\text{експ}}) - 1$; $\delta = (S^{\text{розрах}}/S^{\text{експ}}) - 1$) та середні значення модулів цих відхилень $\bar{\delta} = \sum_{n=1}^{N\delta} |\delta(T_n)| / N\delta$ (табл. 5) показують,

що наведені результати розрахунків задовільно узгоджуються з дослідними даними.

Таблиця 4. Порівняння розрахункових та експериментальних значень щільності, ентальпії й ентропії

T , К	D , кг/м ³	D [25], кг/м ³	H , кДж/кг	H [25], кДж/кг	S , кДж/(кг·К)	S [25], кДж/(кг·К)
$p = 0.1$ МПа						
70	838,45	837,86	126,36	110,5	2,757	2,628
80	4,353	4,37	328,76	328,3	5,463	5,457
90	3,833	3,85	339,56	338,8	5,59	5,58
100	3,429	3,44	350,19	349,5	5,703	5,693
110	3,104	3,11	360,76	360,2	5,803	5,795
120	2,837	2,84	371,28	370,8	5,895	5,887
200	1,6882	1,69	454,87	454,5	6,429	6,422
250	1,34885	1,35	506,84	506,7	6,661	6,655
300	1,1234	1,12	558,77	558,8	6,85	6,844
350	0,9626	0,96	610,77	610,9	7,011	7,005
$p = 5$ МПа						
70	849,657	847,64	130,28	114,4	2,73	2,60
80	807,857	806,29	148,1	134,8	2,968	2,873
90	761,098	760,87	167,86	155,1	3,2	3,112
100	710,637	711,62	188,69	175,7	3,42	3,329
110	655,410	654,93	210,28	197,6	3,625	3,538
120	591,739	582,07	233,14	222,6	3,824	3,755
200	93,677	93,42	432,42	429,8	5,184	5,168
250	69,877	69,58	492,15	491,1	5,451	5,442
300	56,587	56,35	548,53	548,2	5,657	5,65
350	47,8325	47,67	603,47	603,6	5,827	5,821
$p = 10$ МПа						
70	860,083	856,49	134,36	118,5	2,705	2,575
80	820,748	818,06	154,63	138,4	2,935	2,841
90	777,58	776,24	170,84	158,2	3,161	3,074
100	732,34	732,53	190,9	178,0	3,372	3,282
110	685,119	685,75	211,25	198,3	3,566	3,476
120	635,141	633,03	231,8	219,8	3,745	3,663
200	207,29	199,54	408,64	405,8	4,886	4,869
250	142,62	140,59	478,13	477,1	5,198	5,188
300	112,91	111,69	539,13	539,1	5,421	5,414
350	94,48	93,7	596,92	597,6	5,599	5,596

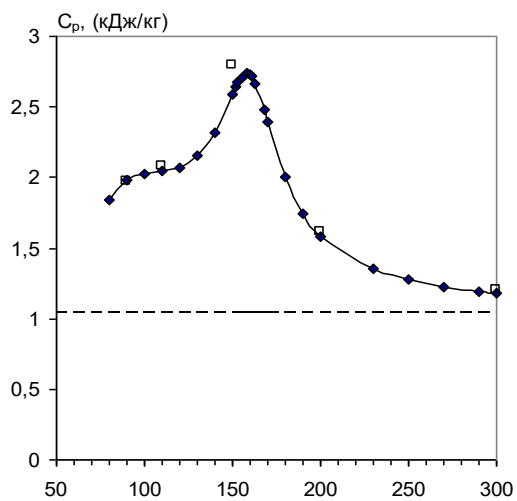


Рис. 4. Теплоємність C_p азоту при тиску $p = 10$ МПа в залежності від температури T (К):

□ – експериментальні дані [25]
суцільна лінія – теплоємність при $p = 10$ МПа для рідинної та газоподібної фази (розрахунок),
пунктирна лінія – теплоємність (ідеальний газ)

Розрахунки термодинамічних властивостей компонентів АП виконані з використанням виразів (9)–(14) уздовж лінії рівноваги рідина-пара від потрійної до критичної точки й в однофазній області до тиску 1000 МПа або, якщо його не можливо досягти через кристалізацію, – до лінії плавлення.

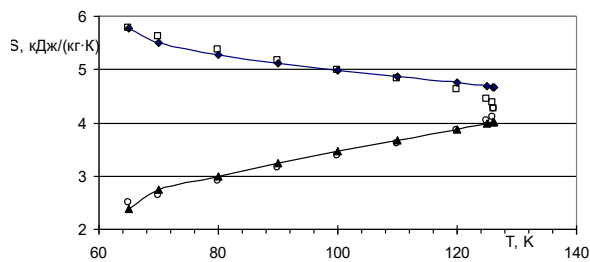


Рисунок 5. Ентропія азоту на лінії кипіння й конденсації в залежності від температури T (К):
○, □ – експериментальні дані [25]
суцільна лінія – ентропія на лінії конденсації (розрахунок),
пунктирна лінія – ентропія на лінії кипіння (розрахунок)

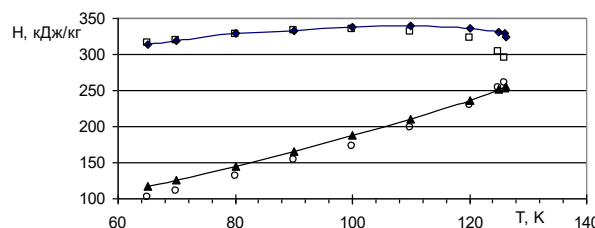


Рис. 6. Ентальпія азоту на лінії кипіння й конденсації в залежності від температури T (К):
○, □ – експериментальні дані [25]
суцільна лінія – ентропія на лінії конденсації (розрахунок),
пунктирна лінія – ентропія на лінії кипіння (розрахунок)

Таблиця 5. Середні значення модулів відхилень $\bar{\delta}$ ентальпії й ентропії азоту

$\bar{\delta}$	Лінія кипіння		Лінія конденсації	
	H	S	H	S
$\bar{\delta}_S$	0,078	0,028	0,031	0,028

У [9] наведені розрахункові значення ентальпії й ентропії рідких вуглеводнів C_1 – C_5 на лінії насичення. При цьому для ідеально-газових властивостей використані вирази (15).

Отримані термодинамічні характеристики компонентів АП дозволяють прогнозувати ці властивості для важких вуглеводнів, а точність опису властивостей на прикладі C_1 й C_2 ілюструють їхні відхилення (різниця) від надійних табличних даних [26,27]. Відхилення δ_S , δ_H для ентропії й ентальпії метану й етану близькі до експериментальних похибок або до відхилень дослідних (або заснованих на них) даних одне від одного [25–28]. Середні значення модулів таких відхилень в інтервалі 105... 150 К становлять, наприклад, для метану й етану: $\bar{\delta}_S = 6,4 \cdot 10^{-3}$ та $7,6 \cdot 10^{-3}$ кДж/(кг·К), $\bar{\delta}_H = 0,77$ та $0,62$ кДж/кг для C_1 й C_2 , відповідно.

Щільність є базовою характеристикою, від точності визначення якої залежить точність опису основних термодинамічних властивостей. У [9] наведене порівняння експериментальних [32,33] і

розрахункових значень щільностей рідких вуглеводнів, що входять до складу АП. Наведені похибки опису щільності за різними рівняннями стану Патела-Тея, Брусіловського, Старлінга-Хана [32, 33] й отримані на базі МТЗ демонструють очевидні переваги запропонованого методу розрахунку.

Отримання результатів розрахунку термодинамічних характеристик альтернативного палива та їх аналіз

Можливості розробленого методу розрахунку фазових рівноваг та термодинамічних властивостей демонструють результати для бінарних і багатокомпонентних сумішей. Отримано великий комплекс результатів для фазових діаграм і наборів термодинамічних властивостей, що добре узгоджуються з експериментом діапазонах станів, які перетинаються та прогнозують зазначені властивості в робочих межах методу:

– рідинний стан – тиск від ліній парарідинної рівноваги до 1000 МПа, або до ліній кристалізації, температура від потрійної точки до критичної точки;

– газоподібний (флюїдний) стан – тиск від 0 до 1000 МПа, температура до 5000 К або до температур термічного розкладання (піролізу) компонентів.

Найбільш складною для опису й порівняно мало дослідженою експериментально є область рідинного стану сумішей, якій приділялася особлива увага.

Отримані розрахункові значення густин рідких компонентів, наведені у [9], порівнюються з дослідними даними, наявними в літературі [32], і визначеними за іншими розрахунковими методиками [33]. Застосування рівнянь із більшим числом коефіцієнтів [33] дозволяє описати більш широку область станів, але тільки вивчену експериментально. Коли емпіричні рівняння стану екстраполюються навіть незначно в недосліджені експериментально діапазони, похибка розрахунку різко зростає.

Можна бачити, що МТЗ забезпечує в середньому втричі менші похибки опису властивостей порівняно з іншими методами.

У табл. 6 наведені (при $T = 112$ К) значення термодинамічних властивостей рідких багатокомпонентних сумішей, близьких за складом до ПГ основних родовищ СНД. Склади сумішей наведені в табл. 7. Густина суміші в однофазній області й на лініях рівноваги з паровою фазою (за рівноважного тиску $p = p_s$) отримана з розв'язання рівнянь у [9]. Тут D_m – густина, H_m – ентальпія, S_m – ентропія, C_{pm} – ізобарна теплоємність, α_m – коефіцієнт теплового розширення, β_m – коефіцієнт ізотермічного стиску.

Результати для ізотерми $T = 112$ К відповідають температурі, близькій до точки нормального кипіння метану (CH_4) і реального ПГ – з невеликими домішками до CH_4 інших компонентів. Відзначимо, що середня похибка опису густини становить, як і для індивідуальних компонентів, дорівнює близько 0,1 %. Аналогічні результати (похибки розрахунків на рівні звичайних експериментальних) отримані й для набору основних термодинамічних властивостей.

Таблиця 6. Термодинамічні властивості ПГ-сумішей на лінії рівноваги при $T = 112$ К

N суміші	D_m , кг/м ³	$-V^E$, см ³ /моль	$-H_m$, кДж/моль	H^E , Дж/моль	S_m , кДж/(кг·К)	C_{pm} , кДж/(кг·К)	α_m , 1/К	β_{Tm} , 1/МПа
0	422,07	–	285,46	–	4,942	3,368	3,344	2,236
1	424,97	0,062	280,30	10,31	4,950	3,359	3,374	2,264
2	427,79	0,123	275,33	20,43	4,951	3,351	3,406	2,298
3	431,45	0,144	293,68	6,47	4,905	3,256	3,235	2,089
4	434,49	0,187	296,34	8,66	4,888	3,221	3,200	2,046
5	434,34	0,211	288,64	17,04	4,913	3,248	3,263	2,118
6	438,71	0,288	288,05	26,51	4,891	3,215	3,251	2,098
7	436,97	0,242	289,71	20,32	4,898	3,219	3,239	2,090
8	441,32	0,258	289,11	29,78	4,876	3,187	3,228	2,071
9	437,19	0,277	283,72	27,43	4,914	3,240	3,292	2,148
10	437,38	0,255	291,32	19,32	4,895	3,213	3,228	2,074
11	441,57	0,295	283,18	36,90	4,892	3,207	3,280	2,128
12	439,82	0,309	284,82	30,72	4,899	3,212	3,268	2,119
13	441,74	0,271	290,72	28,75	4,873	3,181	3,217	2,055
14	439,98	0,284	292,36	22,56	4,881	3,186	3,205	2,047
15	444,19	0,326	284,27	40,19	4,877	3,179	3,256	2,099
16	444,32	0,299	291,75	32,00	4,859	3,154	3,194	2,09
17	440,25	0,322	286,42	29,80	4,896	3,206	3,256	2,102
18	444,61	0,339	285,86	39,24	4,875	3,174	3,245	2,083
19	442,84	0,352	287,49	33,05	4,882	3,178	3,233	2,075
20	447,20	0,368	286,92	42,50	4,860	3,147	3,222	2,056

Таблиця 7. Склад ПГ-сумішей

N суміші	Мольні частки компонентів, %				
	C_1	C_2	C_3	N_2	CO_2
0	100	–	–	1	–
1	99	–	–	–	–
2	98	–	–	2	–
3	97	3	–	–	–
4	96	4	–	–	–
5	96	3	–	1	–
6	95,5	3	–	1	0,5
7	95,5	3	0,5	1	–
8	95	3	0,5	1	0,5
9	95	3	–	2	–
10	95	4	–	1	–
11	94,5	3	–	2	0,5
12	94,5	3	0,5	2	–
13	94,5	4	–	1	0,5
14	94,5	4	0,5	1	–
15	94	3	0,5	2	0,5
16	94	4	0,5	1	0,5
17	94	4	–	2	–
18	93,5	4	–	2	0,5
19	93,5	4	0,5	2	–
20	93	4	0,5	2	0,5

Виконані також розрахунки термодинамічних властивостей низки багатокомпонентних сумішей: природного газу, газового конденсату, біогазу, шахтного газу, світильного газу, коксового газу й ін. (див. монографію [9]).

Висновки

Аналіз наведених результатів засвідчує доцільність застосування розробленої математичної моделі з визначення параметрів ФР і теплофізичних властивостей АП вуглеводневого типу. За всім комплексом властивостей, що розраховуються, цей метод має значні переваги перед існуючими модельними й емпіричними методами.

Основними перевагами розрахункового методу, заснованого на схемі МТЗ, є такі:

- мінімальне число вихідних даних, необхідне й достатнє для розрахунків;
- відсутність необхідності в підгінних параметрах та емпіричних кореляціях;
- адекватність статистико-механічної моделі, що лежить в основі методу;
- застосовність для великого класу речовин та їх сумішей;
- придатність застосування в широких областях станів;
- похибки розрахунків не перевищують похибки експерименту.

Застосування розробленого методу забезпечує можливість поточного визначення теплофізичних властивостей і фазових рівноваг багатокомпонентних сумішей у багатьох технологічних процесах, дозволяє обмежити або виключити трудомісткі й тривалі експериментальні дослідження, що сприяє підвищенню їх економічності.

Наукова новизна результатів дослідження

Удосконалено математичний апарат на основі модифікованої теорії збурень для вичерпного описання всіх теплофізичних характеристик альтернативних моторних палив зі сферичною конфігурацією взаємодіючих структурних елементів, які перебувають як у рідинному, так і в газоподібному агрегатному стані, у частині зменшення часу розрахунку та зниження похибки отримання теплофізичних характеристик порівняно з довідниковими та експериментальними даними.

Практичне значення результатів дослідження. Удосконалений математичний апарат *придатний* для надання точної інформації до складу набору вихідних даних у дослідженнях щодо виробництва, зберігання, перевезення, дистрибуції, використання альтернативних моторних палив зі сферичною конфігурацією взаємодіючих структурних елементів, які перебувають як у рідинному, так

і в газоподібному агрегатному стані, а також прогнозування перебігу та результатів процесів забруднення атмосфери газоподібними продуктами повного й неповного горіння компонентів палив у камерах згоряння теплових машин різного типу.

References:

1. Кондратенко О.М. Фізичне і математичне моделювання процесів у фільтрах твердих частинок у практиці критеріального оцінювання рівня екологічної безпеки : монографія / О.М. Кондратенко, В.Ю. Колосков, Ю.Ф. Деркач, С.А. Коваленко. – Х.: Стиль-Іздат (ФОП Бровін О.В.), 2020. – 522 с.
2. Парсаданов І.В. Підвищення якості і конкурентоспроможності дизелів на основі комплексного паливно-екологічного критерію: монографія. – Х.: Центр НТУ «ХПІ», 2003. – 244 с.
3. Kondratenko O.M. Determination of reference values of complex fuel and ecological criterion as the separate independent factor of ecological safety / O.M. Kondratenko, V.A. Andronov, V.Yu. Koloskov, O.O. Tkachenko, Ye.V. Kapinos // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2021. – № 1. – pp. 75–85. – DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.10.
4. Kondratenko O. Development and Use of the Index of Particulate Matter Filter Efficiency in Environmental Protection Technology for Diesel-Generator with Consumption of Biofuels / O. Kondratenko, V. Andronov, V. Koloskov, O. Strokov // *2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology: Conference Proceedings (13–17 September 2021, NTU «KhPI», Kharkiv)*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2021. – pp. 239–244. – DOI: 10.1109/KhPI Week53812.2021.9570034.
5. Kondratenko O. Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels / O. Kondratenko, V. Koloskov, S. Kovalenko, Y. Derkach, O. Strokov // *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020: Conference Proceedings (05–10 October 2020, NTU «KhPI», Kharkiv)*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2020. – pp. 177–182. – DOI: 10.1109/KhPI Week 51551.2020.9250118.
6. Kondratenko O. Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels / O. Kondratenko, I. Mishchenko, G. Chernobay, Yu. Derkach, Ya. Suchikova // *2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018): Book of Papers (10–14 September, 2018, NTU «KhPI», Kharkiv)*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – pp. 57–1–57-6. – DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570.
7. Marchenko A. Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO / A. Marchenko, I. Parsadanov, A. Prokhorenko at al. // *Proceedings of the 12th International Conference Transport Means*. – 2008. – pp. 312–319.
8. Levterov A. Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels / A. Levterov, A. Levterov. *Functional Materials*. – 2018. – Vol. 25, No. 2. – pp. 308–312.
9. Умеренкова К.Р. Перспективи використання альтернативних палив і методика визначення їх теплофізичних характеристик: монографія / К.Р. Умеренкова, В.Г. Борисенко // – Х.: НУЦЗУ, 2022. – 92 с.
10. Умеренкова К.Р. Визначення теплофізичних властивостей альтернативних моторних палив як аспект екологізації двигунів внутрішнього згоряння / К.Р. Умеренкова, А.М. Левтеров, О.М. Кондратенко // *Проблеми техногенно-екологічної безпеки в сфері цивільного захисту: Матеріали Всеукраїнської науково-*

- практичної конференції (08–09 грудня 2022 р., НУЦЗУ, Харків). – Х.: НУЦЗУ, 2022. – С. 162–165. 11. Umerenkova K.R., Borysenko V.G., Kondratenko O.M., Lievtierov A.M. Determination of thermophysical properties of alternative motor fuels as an aspect of environmental aspect of internal combustion engines / *Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (19 травня 2023 р., НУЦЗУ, Харків)*. – Х.: НУЦЗУ, 2023. с. 450–451. 12. Ablieieva I. Scientific and methodological approaches to assessing the safety of oil production complexes as potentially dangerous objects / I. Ablieieva, L. Plyatsuk, I. Trunova, O. Burla, V. Krasulia // *Technogenic and ecological safety*. – 2022. – 11(1/2022) – pp. 8–17. – DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.2. 13. Суханов В.П. Переработка нефти. 2-е изд. перераб. и доп. / В.П. Суханов. – М.: Высшая школа, 1979. – 335 с. 14. Kondratenko O. Determination of emissions of vapour of flammable technical liquids from enterprises for their storing and distribution and rational adjustments of their breathing valves / O. Kondratenko, V. Koloskov, S. Kovalenko, Yu. Derkach, O. Botsmanovska, N. Podolyako // *Technogenic and ecological safety* – 2020. – № 8(2/2020). – pp. 17–31. – DOI: 10.5281/zenodo.4300753. 15. Марченко А.П. Двигуни внутрішнього згоряння та навколишнє середовище / А.П. Марченко, І.В. Парсаданов, О.П. Строчков // *Двигуни внутрішнього згоряння*. – 2022. – № 2. – С. 3–12. – DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01. 16. Гирифельдер Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей / Дж. Гирифельдер, Ч. Кертуис, Р. Берд // – М.: Изд-во иностр. л-ры, 1961. – 930 с. 17. Barker J.A. What is liquid? Understanding the states of matter / J.A. Barker, D. Henderson // *Rev. Mod. Phys.* – 1976. – Vol. 48, N 4. – P. 587–671. 18. Крокстон К. Физика жидкого состояния / К. Крокстон // – М.: Мир, 1978. – 400 с. 19. Маринин В.С. Теплофизика альтернативных энергоносителей / В.С. Маринин. – Х.: Форт, 1999. – 212 с. 20. Маринин В.С. О возможной модификации метода теории возмущений в статистической физике жидкостей / В.С. Маринин, В.В. Пашков // *Укр. физ. журн.* – 1976. – Т. 21, № 10. – С. 1695–1700. 21. Гуревич Г.Р. Справочная помощь по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей / Г.Р. Гуревич, А.И. Брусиловский. – М.: Надра, 1984. – 264 с. 22. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с. 23. Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода / В.В. Алтунин. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 546 с. 24. Сычев В.В. Термодинамические свойства кислорода / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 306 с. 25. Сычев В.В. Термодинамические свойства азота / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1977. – 352 с. 26. Сычев В.В. Термодинамические свойства метана / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко и др. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 348 с. 27. Сычев В.В. Термодинамические свойства этана / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко и др. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 304 с. 28. Сычев В.В. Термодинамические свойства пропана / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 268 с. 29. Orrit J.E., Laupretre J.M. Calculational method for the density of LNG / J.E. Orrit, J.M. Laupretre // *Adv. Cry. Eng.* – 1978. – Vol.23. – P. 566–579. 30. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с. 31. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадкин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с. 32. Jarborough L. Vapor-liquid equilibrium data for multicomponent mixture containing hydrocarbon and non-hydrocarbon components / L. Jarborough // *AiCh J.* – 1972. – Vol. 17, № 2. – P. 129–133. 33. Метан жидкий и газообразный. Таблицы стандартных справочных данных. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 11 с. 34. Смирнова Н.А. Молекулярные теории растворов / Н.А. Смирнова. – Л.: Химия, 1987. – 336 с. 35. Prigogine Y. The molecular theory of solutions / Y. Prigogine. – Amsterdam: North-Holland Publ. Company, 1957. – 448 p. 36. Leland T.W. Recent developments in the theory of fluid mixtures / T.W. Leland // *Adv. Cry. Eng.* – 1975. – Vol.21. – P. 466–484. 37. Гуревич Л.В. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л.В. Гуревич, Г.В. Карачевцев. – М.: Наука, 1974. – 351 с. 38. Вукс М.Ф. Рассеивание света в газах, жидкостях и растворах / М.Ф. Вукс. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – 320 с. 39. Людмирская Г.С. Равновесие жидкость-пар. Справочник / Г.С. Людмирская, Т.А. Барсукова, А.М. Богомольный. – М.: Химия, 1987. – С. 336. 40. Коган В.Б. Равновесие между жидкостью и паром. Справочное пособие. Кн.1 / В.Б. Коган, В.М. Фридман, В.В. Кафаров. – М.: Наука, 1966. – С. 1311. 41. Parrish W.R. Liquid-vapor equilibria in the N₂-CH₄ system between 95 and 120 K / W.R. Parrish, M.J. Hiza // *Adv. Cry. Eng.* – 1974. – Vol. 19. – P. 300–308.

References (transliterated):

- Kondratenko, O.M., Koloskov, V.Yu., Derkach, Yu.F., Kovalenko, S.A. (2020), Physical and mathematical modeling of processes in particulate filters in the practice of criteria for assessing the level of environmental safety: monograph [Fizichne i matematichne modelyuvannya procesiv u fil'trah tveridih chastinok u praktici kriterial'nogo ocinyuvannya rivnya ekologichnoi bezpeki : monografiya], Publ. Style-Izdat (FOP Brovin O.V.), Kharkiv, 522 p. 2. Parsadanov, I.V. (2003), Improving the quality and competitiveness of diesel engines based on complex fuel and ecological criteria: monograph [Pidvishchennya yakosti i konkurentospromozhnosti dizeliv na osnovi kompleksnogo palivno-ekologichnogo kriteriyu: monografiya], Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, 244 p. 3. Kondratenko, O.M., Andronov, V.A., Koloskov, V.Yu., Tkachenko, O.O., Kapinos, Ye.V. (2021), «Determination of reference values of complex fuel and ecological criterion as the separate independent factor of ecological safety». *Internal combustion engines*, 2021, № 1, pp. 75–85, DOI: 10.20998/0419-8719.2021.1.10. 4. Kondratenko, O., Andronov, V., Koloskov, V., Strokov, O. (2021), «Development and Use of the Index of Particulate Matter Filter Efficiency in Environmental Protection Technology for Diesel-Generator with Consumption of Biofuels», 2021 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (13–17 September 2021): Conference Proceedings, Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, 2021, pp. 239–244, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570034. 5. Kondratenko, O., Mishchenko, I., Chernobay, G., Derkach, Yu., Suchikova, Ya. (2018), «Criteria based assessment of the level of ecological safety of exploitation of electric generating power plant that consumes biofuels», 2018 IEEE 3rd International International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS–2018) (10–14 September 2018): Book of Papers, Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, pp. 185–189, DOI: 10.1109/IEPS.2018.8559570. 6. Kondratenko, O., Koloskov, V., Strokov, O., Kovalenko, S., Derkach, Yu. (2020), «Criteria based assessment of efficiency of conversion of reciprocating ICE of hybrid vehicle on consumption of biofuels», 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (05 – 10 October 2020): Conference Proceedings, Publ. NTU «KhPI», Kharkiv, pp. 177–182, DOI: 10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250118. 7. Marchenko, A., Parsadanov, I., Prokhorenko, A. et al. (2008), «Research of energy effectiveness and exhaust emissions of direct injection diesel engine running on RME and its blends with DO», *Proceedings of the 12th International Conference Transport Means*, pp. 312–319.

8. Levterov, A., Levterov, A. (2018), «Thermodynamic properties of fatty acid esters in some biodiesel fuels», *Functional Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 308–312.
9. Umerenkova K.R., Borysenko V.G. (2022) *Prospects for the use of alternative fuels and methods of determining their thermophysical characteristics: monograph [Perspektyvy vykorystannia alternatyvnykh palyv i metodyka vyznachennia yikh teplofizychnykh kharakterystyk: monografiia]*. Kharkiv, NUCDU, 92 p.
10. Umerenkova K.R., Lievtierov A.M., Kondratenko O.M. (2022) «Determination of thermophysical properties of alternative motor fuels as an aspect of greening of internal combustion engines» [Vyznachennia teplofizychnykh vlastyvoستي alternatyvnykh motor-znykh palyv yak aspekt ekolohizatsii dvyhuniiv vnutrishnoho zghoriannia], *Problems of technogenic and ecological safety in the field of civil protection: Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference (December 08–09, 2022, NUCDU, Kharkiv)* Kharkiv, NUCDU, pp. 162–165.
11. Umerenkova K.R., Borysenko V.G., Kondratenko O.M., Lievtierov A.M. (2023) «Determination of thermophysical properties of alternative motor fuels as an aspect of environmental aspect of internal combustion engines», *Problems of Emergency Situations: Materials of the International Scientific and Practical Conference, (19 May 2023, NUCDU, Kharkiv)*, Kharkiv, NUCDU, pp. 450–451.
12. Ablieieva, I., Plyatsuk, L., Trunova, I., Burla, O., Krasulia, B. (2022), «Scientific and methodological approaches to assessing the safety of oil production complexes as potentially dangerous objects», *Technogenic and ecological safety*, 2022, 11 (1/2022), pp. 8–17, DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.2.
13. Surhanov, V.P. (1979), *Oil refining*. 2nd ed. revised and added. [Pererabotka nefii. 2 izd. ispr. i dop.], Publ. Vysshaya shkola, Moscow, 335 p.
14. Kondratenko, O., Koloskov, V., Kovalenko, S., Derkach, Yu., Botsmanovska, O., Podolyako, N. (2020), Determination of emissions of vapour of flammable technical liquids from enterprise for their storing and distribution and rational adjustments of their breathing valves, *Technogenic and ecological safety*, 8(2/2020), pp. 17–31, DOI: 10.5281/zenodo.4300753.
15. Marchenko A.P., Parsadanov I.V., Stokov O.P. (2022) «Internal combustion engines and the environment» [Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia ta navkolyshnie seredovyshche], *Internal Combustion Engines*, № 2, pp. 3–12, DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01.
16. Gürshpfelder J., Kertiss Ch., Bird R. (1961) *Molecular theory of gases and liquids [Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey]*, Moscow, Publ. Izd-vo Inostr. Lit., 930 p.
17. Barker J.A., Henderson D. (1976) «What is liquid? Understanding the states of matter», *Rev. Mod. Phys.*, Vol. 48, N 4, pp. 587–671.
18. Krockstone K. (1978) *Physics of the liquid state [Fizika zhidkogo sostoyaniya]*, Moscow, Mir, 400 p.
19. Marinin V.S. (1999) *Thermophysics of alternative energy carriers [Teplofizika alternatyvnykh energonositeley]*, Kharkiv, Fort, 212 p.
20. Marinin V.S., Pashkov V.V. (1976) «On a possible modification of the perturbation theory method in the statistical physics of fluids» [O vozmozhnoy modifikatsii metoda teorii vozmuscheniy v statisticheskoy fizike zhidkostey], *Ukr. Phys. Journal*, Vol. 21, № 10, pp. 1695–1700.
21. Gurevich G.R., Brusilovskii A.I. (1984) *Reference help for calculating the phase state and properties of gas-condensate mixtures [Spravochnaya pomoshch po raschetu fazovogo sostoyaniya i svoystv gazokondensatnykh smesey]*, Moscow, Nedra, 264 p.
22. Rid R., Prausnitz J., Sherwood T. (1982) *Properties of gases and liquids [Svoystva gazov i zhidkostey]*, Leningrad, Khimia, 592 c.
23. Altunin V.V. (1975) *Thermophysical properties of carbon dioxide [Teplofizicheskie svoystva dyuokisi ugleroda]*, Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 546 p.
24. Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. and etc. (1981) *Thermodynamic properties of oxygen [Termodinamicheskie svoystva kisloroda]* Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 306 p.
25. Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. and etc. (1977) *Thermodynamic properties of nitrogen [Termodinamicheskie svoystva azota]* Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 352 p.
26. Sychev V.V., Wasserman A.A., Zagoruchenko V.A. and etc. (1979) *Thermodynamic properties of methane [Termodinamicheskie svoystva metana]* Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 348 p.
27. Sychev V.V., Wasserman A.A., Zagoruchenko V.A. and etc. (1982) *Thermodynamic properties of ethan [Termodinamicheskie svoystva etana]* Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 304 p.
28. Sychev V.V., Wasserman A.A., Kozlov A.D. and etc. (1989) *Thermodynamic properties of propane [Termodinamicheskie svoystva propana]* Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 268 p.
29. Orrit J.E., Laupretre J.M. (1978) «Calculational method for the density of LNG», *Adv. Cry. Eng.*, Vol.23, pp. 566–579.
30. Vargaftik N.B. (1972) *Handbook on thermophysical properties of gases and liquids [Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey]*, Moscow, Nauka, 720 p.
31. Malkov M.P., Danilov I.B., Zeldovich A.G., Fradkov A.B. (1985) *Handbook of physical and technical foundations of cryogenics [Spravochnik po fiziko-tehnicheskim osnovam kriogeniki]*, Moscow, Energoatomizdat, 432 p.
32. Jarborough L. (1972) *Vapor-liquid equilibrium data for multicomponent mixture containing hydrocarbon and non-hydrocarbon components*, *AiCh J.*, Vol. 17, № 2, pp. 129–133.
33. Methane is liquid and gaseous. *Tables of standard reference data [Metan zhidkiy i gazoobraznyiy. Tablitsyi standartnykh spravochnykh daniy]*, Moscow, Publ. Izd-vo Standartov, 1982, 11 p.
34. Smyrnova N.A. (1987) *Molecular theories of solutions [Molekulyarnye teorii rastvorov]*, Leningrad, Khimia, 336 p.
35. Prigogine Y. (1957) *The molecular theory of solutions*, Amsterdam, North-Holland Publ. Company, 448 p.
36. Leland T.W. (1975) *Recent developments in the theory of fluid mixtures*, *Adv. Cry. Eng.*, Vol.21, pp. 466–484.
37. Guevich L.V., Karachentsev G.V. (1974) *Energy of breaking chemical bonds. Ionization potentials and electron affinity [Energiya razryva himicheskikh svyazey. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu]*, Moscow, Nauka, 351 p.
38. Vooks M.F. (1977) *Scattering of light in gases, liquids and solutions [Rasseivanie sveta v gazah, zhidkostyah i rastvorah]*, Leningrad, Publ. LGU, 320 p.
39. Ludmirskaya G.S., Barsukova T.A., Bogomolnyi A.M. (1987) *Liquid-vapor equilibrium. Directory [Ravnovesie zhidkost-par. Spravochnik]*, Moscow, Khimia, 336 p.
40. Kogan V.B., Fridman V.M., Kafarov V.V. (1966) *Equilibrium between liquid and vapor. Reference manual. Book 1 [Ravnovesie mezhdz zhidkostyu i parom. Spravochnoe posobie. Kn.1]*, Moscow, Nauka, 1311 p.
41. Parrish W.R., Hiza M.J. (1974) *Liquid-vapor equilibria in the N₂-CH₄ system between 95 and 120 K*, *Adv. Cry. Eng.*, Vol. 19, pp. 300–308.

Received to the editorial office 25.05.2023

Kondratenko Olexandr Mykolayovych – D.Sc.(Eng.), Associate Professor, Professor of Department of Applied Mechanics and Environment Protection Technologies of Faculty of Technogenic and Ecological Safety, National University of Civil Protection of Ukraine of SES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kongratenkoom2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-9687-0454, Scopus ID: 57144373800, ResearcherID: D-7346-2018, Google Scholar ID: 0iIbJMcaAAAj.

Umerenkova Ksenia Rostyslavivna – Cand.Sc.(Eng.), Associate Professor, Lecturer of Department of Physical and Mathematical Disciplines of Faculty of Technogenic and Ecological Safety, National University of Civil Protection of Ukraine of SES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: kruukr1946@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3654-4814, Scopus ID: 16318085300, Google Scholar ID: 0JdUAAAAj.

Lievtierov Anton Mykhailivych – Cand.Sc.(Eng.), Senior Researcher, Senior Researcher of Department of Hydrogen Energetics of A.M. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: antmix1947@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5308-1375, Scopus ID: 55795527600, Google Scholar ID: 7tyvcX0AAAAj.

Stokov Olexandr Petrovych – D.Sc.(Eng.), Professor, Professor of Department of Automobile Transport and Transport Technologies of the Kremenchuk Branch of the Classical Private University, Kremenchuk, Ukraine, Full Member of the Engineering Academy of Ukraine, Member of the National Union of Journalists of Ukraine, e-mail: ataman1946@ukr.net, Scopus ID: 57144561500.

Koloskov Volodymyr Yuriyovych – Cand.Sc.(Eng.), Associate Professor, Head of Department of Applied Mechanics and Environment Protection Technologies of Faculty of Technogenic and Ecological Safety, National University of Civil Protection of Ukraine of SES of Ukraine, Kharkiv, Ukraine, e-mail: koloskov_v@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9844-1845, Scopus ID: 57203686820, Google Scholar ID: gP6w7a8AAAAJ

IMPROVEMENT OF THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF ALTERNATIVE MOTOR FUELS BASED ON THE MODIFIED THERMODYNAMIC THEORY OF DISTURBANCE. PART 2

Kondratenko O. M., Umerenkova K. R., Lievtierov A. M., Stokov O. P., Koloskov V. Yu.

In the study, the purpose of which was to improve the mathematical apparatus based on the modified thermodynamic perturbation theory for describing the thermophysical characteristics of alternative motor fuels with a spherical configuration of interacting structural elements and an arbitrary aggregate state, the formal scheme of the modified perturbation theory was consistently constructed, the main characteristics of the model system were described, the parameters of the interaction potentials of the alternative fuel components were described, the thermophysical properties of the alternative fuel components were obtained by calculation, the thermodynamic properties of the alternative fuel components were calculated, the results of the calculation of the thermodynamic characteristics of the alternative fuel were analyzed and illustrated in the form of isotherm of phase equilibrium diagrams and data tables. The object of the study is the thermophysical characteristics of traditional, alternative and mixed motor fuels in a liquid or gaseous aggregate state. The subject of the study is a mathematical apparatus based on the modified thermodynamic perturbation theory for describing the thermophysical characteristics of motor fuels. The scientific novelty of the study results lies in the fact that a mathematical apparatus based on a modified perturbation theory has been improved for a comprehensive description of all thermophysical characteristics of motor fuels of any genesis, i.e. traditional, alternative and mixed, which are in both liquid and gaseous aggregate states in terms of reducing the calculation time and reducing the error of obtaining thermophysical characteristics in comparison with reference and experimental data. The practical significance of the research results is that the improved mathematical apparatus is marketable for providing accurate information to the composition of the initial data set in research on the production, storage, transportation, distribution, use of motor fuels of any genesis, which are in different states, as well as forecasting the course and results of processes of atmospheric pollution by gaseous products of complete and incomplete combustion of fuel components in combustion chambers of various types of heat engines.

Key words: thermophysical properties, traditional motor fuels, alternative motor fuels, mathematical model, environmental protection technologies, ecological safety, power plants, reciprocating internal combustion engines.