

ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ТА В'ЯЗКІСТЬ ЦЕЗІЮ В ГАЗОВІЙ ФАЗІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

На основі експериментальних даних по в'язкості пари цезію розроблено таблиці в'язкості та теплопровідності в широкому інтервалі температур та тисків.

Ключові слова: цезій, теплопровідність, в'язкість, газова фаза, перерізи зіткнень.

Abstract

On the basis of experimental data on viscosity of pair of caesium the tables of viscosity and heat-conducting are worked out in the wide interval of temperatures and pressures.

Keywords: cesium, thermal conductivity, viscosity, gas phase, cross sections of collisions.

Вступ

Успішне вирішення значного числа проблем сучасної техніки зв'язано з застосуванням пари лужних металів. Область їх можливого застосування надзвичайно велика. Це теплові труби, газофазні ядерні реактори (суміш пари лужних металів), МГД – генератори (переважно Cs і K), термоемісійні перетворювачі енергії (Cs), високоенергетичні акумулятори, іонні двигуни (Cs), атомні електростанції на швидких нейтронах, прилади нічного бачення (Cs).

Можливість застосування лужних металів в якості високотемпературних теплоносіїв і робочих тіл енергетичних установок стало причиною значного числа досліджень їх теплофізичних властивостей. Багатокомпонентні теплові носії і робочі тіла, що створені на базі сумішей лужних металів, мають унікальні властивості – змінюючи компонентний склад, можна отримати суміші з заданими характеристиками.

Транспортні властивості металів у газовій фазі при високих температурах також необхідні при моделюванні руху метеоритів у атмосфері Землі [1].

Результати дослідження

При температурах до 2000 К і тисках 1...1500 кПа лужні метали в газовій фазі можна розглядати як бінарну газову суміш, що складається з атомів і двохатомних молекул, між якими протікають реакції дисоціації.

Процеси перенесення лужних металів у газовій фазі описуються моделлю ідеального газу, в якому протікають реакції утворення та розпаду молекул, що дозволяє застосувати результати строгої кінетичної теорії Чепмена-Енскога і Гіршфельдера-Брокау для суміші реагуючих газів.

Коефіцієнти перенесення в'язкості та теплопровідності пари лужного металу можна виразити через два параметри [2]: ефективні перерізи зіткнень “атом-атом” $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ та відносні перерізи зіткнень “атом-молекула” β_{12}^2 . Ефективні перерізи зіткнень “атом-атом” характеризують залежність коефіцієнтів перенесення одноатомної пари від температури, а відносні β_{12}^2 – залежність від концентрації двохатомних молекул, яка є функцією тиску.

В'язкість одноатомної пари $\eta_1(T)$ та ефективні перерізи зіткнень атомів $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)$ зв'язані між собою співвідношенням:

$$\eta_1(T) \cdot 10^7 = \frac{26,693 \sqrt{\mu T}}{\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)}, \quad (1)$$

Де μ – молярна маса атомарного газу, T – абсолютна температура газу

В'язкість $\eta_1(T)$ і теплопровідність $\lambda_1(T)$ одноатомної пари цезію в широкому інтервалі температури лінійно залежить від температури:

$$\eta_1(T) = \eta_0 + A_\eta(T - 1000), \quad (2)$$

$$\lambda_1(T) = \lambda_0 + A_\lambda(T - 1000). \quad (3)$$

Зв'язок між $\eta_1(T)$ і $\lambda_1(T)$ описується емпіричною залежністю

$$\frac{\lambda_1(T)}{\eta_1(T)} = \frac{31.2}{\mu}, \quad (4)$$

де μ — молярна маса атомарного газу, T — абсолютна температура газу.

У роботах Н.Б. Варгафтіка та В.С. Яргіна отримано вирази для в'язкості і теплопровідності пари лужних металів у вигляді розкладу в ряд за концентрацією X_2 молярної долі двохатомних молекул, яку для парів лужних металів можна розглядати як малий параметр.

$$\eta(T, x_2) = \eta_1(T) \left(1 + \sum_{n=1}^m A_n x_2^n \right), \quad (5)$$

$$\lambda(T, x_2) = \lambda_1(T) \left(1 + \sum_{n=1}^m (B_n^{BH} + B_n^{II}) x_2^n + B_p (\Delta H / RT)^2 x_2 (1 - x_2) / (1 + x_2)^2 \right), \quad (6)$$

де ΔH — тепловий ефект реакції дисоціації молекул при температурі T , коефіцієнти: $A_n, B_n^{BH}, B_n^{II}, B_p$ вони визначаються через відносні перерізи зіткнень та термодинамічні константи пари лужних металів, їх числові значення наведено в таблиці 1.

Рівняння (5, 6) дають можливість проводити узагальнення результатів експериментальних даних.

У роботі [2] за результатами експериментального дослідження в'язкості пари цезію визначено ефективні перерізи зіткнень “атом-атом” $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ та відносні перерізи зіткнень “атом-молекула” β_{12}^2 , встановлено залежність в'язкості одноатомної пари від температури, розраховано коефіцієнти рівнянь (5,6), їх числові значення наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Коефіцієнти рівнянь (5,6)

n	1	2	3	n	1	2	3	n	1	2	3	Вр	0,151
A_n	-1.762	3.073	-5.256	B_n^n	-2.231	3.852	-6.640	B_n^{BH}	0.244	-0.281	0.324		

Значення відносних перерізів зіткнень атом–молекула β_{12}^2 та коефіцієнтів рівняння (1) при енергії дисоціації молекул $D_{0Cz}^0 = 44380 \pm 1000$ Дж/моль наведено в таблиці 2, значення ефективних перерізів зіткнень в таблиці 2.

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів рівнянь (1, 2) [2]

$\eta_0 \cdot 10^7$, Па·с	$A \cdot 10^7$, Па·с/К	β_{12}^2	$\Delta\eta_0$, %	ΔA , %	$\Delta \beta_{12}^2$, %
292,4	0,256	2,2	2,3	5,2	20

Таблиця 3. Ефективні перерізи зіткнень атом-атом [2]

T, К	700	900	1000	1100	1200	1300	1500	1700	1800
$\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$, Å^2	37,8	34,6	33,3	32,1	31,0	30,1	28,4	26,9	26,3

В інтервалі температур 700...2000К для пари цезію залежність ефективних перерізів зіткнень „атом-атом” від температури апроксимується рівнянням :

$$\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)_{Cs} = 54,7 - 32,5 \frac{T}{1000} + 13,29 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 2,22 \left(\frac{T}{1000} \right)^3, \text{ Å}^2. \quad (6)$$

Розрахунок рекомендованих значень коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності пари цезію проведено за рівнянням (1,2, 4,5). Значення коефіцієнти в'язкості та теплопровідності наведено в таблицях 4, 5.

Таблиця 4. В'язкість цезію в газовій фазі $\eta \cdot 10^7$, Па · с

T, K	Одно- атомна пара η_1	P, кПа									Лінія насичення η_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	215,6	215,7									203,6
800	241,2	240,0	230,2								220,6
900	266,8	266,2	261,0	253,1	242,1						235,9
1000	292,4	292,0	288,9	284,1	276,7	264,1					250,2
1100	318,0	317,8	315,8	312,5	307,4	298,3					264,1
1200	343,6	343,4	342,0	339,8	336,1	329,3	298,1	283,5			277,9
1300	369,2	369,1	368,1	366,4	363,7	358,4	332,8	319,6	299,2		291,9
1400	394,8	394,7	393,9	392,6	390,5	386,4	365,3	353,7	334,8	316,7	306,2
1500	420,4	420,3	419,7	418,7	417,0	413,7	396,1	386,0	368,9	351,7	321,1
1600	446,0	445,9	445,4	444,6	443,2	440,5	425,6	416,8	401,4	385,4	336,4
1700	471,6	471,6	471,1	470,4	469,3	467,0	454,3	446,6	432,8	417,9	352,2
1800	497,2	497,2	496,8	496,6	495,2	493,3	482,3	475,5	463,1	449,5	368,5
1900	522,8	522,8	522,5	521,9	521,1	519,4	509,8	503,8	492,6	480,1	384,9
2000	548,4	548,4	548,1	547,7	546,9	545,4	536,9	531,5	521,5	510,0	–

Таблиця 5. Теплопровідність пари цезію ($\lambda \cdot 10^4$, Вт/(м · К))

T, K	Одно- атомна пара λ_1	Тиск, кПа									Лінія насичення λ_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	50,6	53,7									62,9
800	56,6	57,5	64,9								71,5
900	62,6	63,0	65,9	70,2	75,7						78,6
1000	68,6	68,8	70,1	72,2	75,1	79,8					84,4
1100	74,6	74,7	75,3	76,4	78,0	80,8					89,2
1200	80,6	80,6	81,0	81,6	82,5	84,1	90,3	92,6			93,4
1300	86,6	86,6	86,8	87,1	87,7	88,6	92,7	94,5	96,6		97,2
1400	92,6	92,6	92,7	92,9	93,2	93,8	96,5	97,7	99,3	100,4	100,9
1500	98,6	98,6	98,7	98,8	99,0	99,3	101,0	101,8	102,9	103,8	104,6
1600	104,6	104,6	104,6	104,7	104,8	105,0	106,1	106,6	107,3	107,9	108,4
1700	110,6	110,6	110,6	110,7	110,7	110,8	111,4	111,7	112,2	112,5	112,4
1800	116,6	116,6	116,6	116,6	116,7	116,7	117,0	117,2	117,4	117,5	116,3
1900	122,6	122,6	122,6	122,6	122,6	122,6	122,8	122,8	122,8	122,8	121,1
2000	128,6	128,6	128,6	128,6	128,6	128,6	128,6	128,5	128,5	128,3	–

Похибки табличних коефіцієнтів складають:

- $T \leq 1600$ K, $\eta_1 = 3\%$, $\eta_s = 5\%$, $\lambda_1 = 4\%$, $\lambda_s = 6\%$;
- $1600\text{K} < T \leq 1750$ K, $\eta_1 = 4,5\%$, $\eta_s = 7\%$, $\lambda_1 = 5\%$, $\lambda_s = 8\%$;
- $T > 1750$ K, $\eta_1 = 5\%$, $\eta_s = 10\%$, $\lambda_1 = 8\%$, $\lambda_s = 10\%$.

Розрахунок коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності за рівнянням (3) досить громіздка процедура, яка потребує ряду допоміжних термодинамічних констант. Коефіцієнти в'язкості та теплопровідності цезію в газовій фазі на ізобарах досить точно апроксимуються поліномами третього порядку:

$$\eta \cdot 10^7 = \sum_0^3 c_n \tau^n, \quad \text{Па} \cdot \text{с}, \quad (7)$$

$$\lambda \cdot 10^4 = \sum_0^3 b_n \tau^n, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, \quad (8)$$

де $\tau = \frac{T}{1000}$, $T = 700 \dots 2000$ K.

Похибка апроксимації менша за 1%, що значно нижче похибок табличних значень η і λ . Коефіцієнти рівнянь (7, 8) для пари цезію наведено в таблиці 5..

Таблиця 6. Коефіцієнти рівнянь (7, 8)

P, кПа	T*, К	a ₀		a ₁	a ₂	a ₃	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
			В'язкість				Теплопровідність			
25	850	-114.7		536.5	-174.5	36.0	123.0	-163.7	143.9	-30.7
50	900	-180.0		641.3	-232.3	45.7	157.0	-219.5	174.1	-35.8
100	1000	-247.4		730.9	-271.6	52.2	193.0	-274.4	201.6	-40.3
200	1050	-341.2		861.4	-337.0	54.2	198.5	-264.1	185.1	-35.3
400	1150	-522.1		1139.9	-494.5	95.1	175.7	-198.1	133.5	-23.2
1000	1300	-257.6		501.8	-56.3	0.04	304.9	-417.7	260.5	-47.9
P _s	700	59.7		264.9	-103.1	28.4	-49.8	248.8	-149.2	34.5

Висновки

На основі отриманих експериментальних даних встановлено залежності в'язкості пари цезію від температури і складу (тиску). Розраховані характерні для цих залежностей перерізи зіткнень атом-атом і відносні перерізи зіткнень атом-молекула. Розроблено таблиці та розрахункові рівняння для в'язкості та теплопровідності цезію в газовій фазі при $T=700...2000$ К і $P = 1...1500$ кПа, включаючи лінію насичення, які можна рекомендувати для практичного використання в наукових та інженерних розрахунках фахівцями в області дослідження властивостей металів в газовій фазі, створення нових типів теплоносіїв та розробки високотемпературного енергетичного та технологічного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Федеріко Баріселлі, Альдо Фрещотті, Аннік Губін, Тьєррі Е. Мажин. Аеротермодинамічне моделювання метеорних потоків. Щомісячні повідомлення Королівського астрономічного товариства, том 492, випуск 2, 2020 р., с. 2308–2325, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3559>
2. Dzis V. Viscosity and thermal conductivity of rubidium and cesium in the gas phase [Text] / V. Dzis, O. Dyachynska / Scientific editor and project director: Anita Jankovska. Global trends and prospects of socio-economic development of Ukraine : scientific monograph. – Riga : Baltija Publishing, 2022. – Chapter: Technical science. – P. 468-538.

Дзись Віктор Григорович – канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: dzisvg@gmail.com.

Dzis Viktor G. – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dzisvg@gmail.com.