

В'ЯЗКІСТЬ РУБІДІЮ І ЦЕЗІЮ В ГАЗОВІЙ ФАЗІ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

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

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

Abstract

On the basis of experimental data on the viscosity of cesium vapor, viscosity tables have been developed in a wide range of temperatures and pressures.

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

Вступ

Можливість застосування лужних металів в якості високотемпературних теплоносіїв і робочих тіл енергетичних установок стало причиною значного числа досліджень їх теплофізичних властивостей.

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), термоємнісні перетворювачі енергії (Cs), іонні двигуни (Cs), атомні електростанції на швидких нейтронах.

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

Теоретичні методи розрахунку коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності пари лужних металів як реагуючої газової суміші атомів і двоатомних молекул істотно обмежені через відсутність досить точних даних про потенціали взаємодії “атом-молекула” і “молекула-молекула”. Експеримент поки є єдиним джерелом одержання необхідної інформації про коефіцієнти перенесення пари лужних металів

Результати дослідження

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-Єнскога і Гіршфельдера-Брокау для суміші реагуючих газів.

В'язкість 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 в'язкості одноатомної пари від температури, а відносні β_{12}^2 – залежність в'язкості від концентрації двоатомних молекул, яка є функцією тиску.

В'язкість одноатомної пари η_1 в широкому інтервалі температури лінійно залежить від температури:

$$\eta_1(T) = \eta_0 + A(T - 1000), \quad (1)$$

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:

$$\eta_1(T) \cdot 10^7 = \frac{26.693 \sqrt{\mu T}}{\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)}, \quad (2)$$

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

Значення відносних перерізів зіткнень атом-молекула β_{12}^2 та коефіцієнтів рівняння (1) при енергії дисоціації молекул $D_{ORb}^0 = 48570 \pm 1000$ Дж/моль і $D_{OCz}^0 = 44380 \pm 1000$ Дж/моль приведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Значення коефіцієнтів рівнянь (1, 2) [2]

Метал	$\eta_0 \cdot 10^7$, Па·с	$A \cdot 10^7$, Па·с/К	β_{12}^2	$\Delta\eta, \%$	$\Delta\eta, \%$	$\Delta\beta_{12}^2, \%$
Rb	268,4	0,233	2,3	2,1	3,0	6,5
Cs	292,4	0,256	2,2	1,8	2,4	5,2

За схемою ідеального газу, в якому протікають в реакції дисоціації, в'язкість пари лужного металу описується рівнянням:

$$\eta(T) = \left[\eta_0 + A(T - 1000) \frac{1 + b_{1\eta}x_2 + b_{2\eta}x_2^2}{1 + a_{1\eta}x_2 + a_{2\eta}x_2^2} \right], \quad (3)$$

де x_2 – молярна доля двохатомних молекул в парі; $a_{1\eta}, a_{2\eta}, b_{1\eta}, b_{2\eta}$ – коефіцієнти, які визначаються через перерізи зіткнень “атом-атом” $\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}$ (табл. 2) та “атом-молекула” β_{12}^2 лужних металів.

Таблиця 2

Ефективні перерізи зіткнень атом-атом [2]

T, K		700	900	1000	1100	1200	1300	1500	1700	1800
$\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}, A^{\circ 2}$	Cs	37,8	34,6	33,3	32,1	31,0	30,1	28,4	26,9	26,3
	Rb	32,9	30,2	29,1	28,1	27,1	26,3	24,8	23,6	23,0

В інтервалі температур 700...2000К залежність ефективних перерізів зіткнень „атом-атом” від температури апроксимується рівняннями :

$$\sigma_{11}^2 \Omega_{11}^{(2,2)*}(T)_{Rb} = 41,7 - 26,8 \frac{T}{1000} + 10,50 \left(\frac{T}{1000} \right)^2 - 1,69 \left(\frac{T}{1000} \right)^3, A^{\circ 2}, \quad (5)$$

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

Розрахунок рекомендованих значень коефіцієнтів в'язкості парів рубідію та цезію проведено за рівнянням (3). Коефіцієнти в'язкості приведено в табл. 3, 4.

Таблиця 3

В'язкість рубідію в газовій фазі $\eta \cdot 10^7$, Па · с

T, K	η_1	Тиск, кПа									η_s
		1	10	25	50	100	400	600	1000	1500	
700	198,5	194,2									186,2
800	221,8	220,2	207,4								200,8
900	245,1	244,3	237,9	228,5	215,8						213,9
1000	268,4	268,0	264,3	258,7	250,3	236,5					226,2
1100	291,7	291,4	289,2	285,6	280,0	270,0					238,2
1200	315,0	314,8	313,3	310,9	307,0	299,8	267,7	253,0			250,2
1300	338,3	338,2	337,1	335,4	332,6	327,2	301,2	288,0	267,9		262,4
1400	361,6	361,5	360,7	359,4	357,3	353,2	332,2	320,7	302,2	284,6	274,8
1500	384,9	384,8	384,2	383,2	381,6	378,4	361,2	351,3	334,7	318,1	287,6
1600	408,2	408,1	407,7	406,9	405,5	403,0	388,7	380,3	365,6	350,2	300,8
1700	431,5	431,5	431,1	430,4	429,3	427,2	415,3	408,0	395,0	380,9	314,5
1800	454,8	454,8	454,4	453,9	453,0	451,2	441,0	434,8	423,3	410,5	328,7
1900	478,1	478,1	477,8	477,3	476,6	475,0	466,3	460,8	450,6	439,1	343,7
2000	501,4	501,4	501,1	500,7	500,1	498,8	491,1	486,3	477,2	466,8	359,4

Таблиця 4

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

T, К	η_1	Тиск, кПа									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	–

Похибки табличних коефіцієнтів в'язкості складають:

для цезію: при $700\text{K} \leq T \leq 1600\text{K}$, $\eta_1 = 3\%$, $\eta_s = 5\%$; при $1600\text{T} < 1700\text{K}$, $\eta_1 = 4,5\%$, $\eta_s = 7\%$; при $T > 1700\text{K}$, $\eta_1 = 5\%$, $\eta_s = 10\%$,

для рубідію :при $700 \leq T \leq 1600\text{K}$, $\eta_1 = 3,5\%$, $\eta_s = 5\%$; при $T \leq 1700\text{K}$, $\eta_1 = 5\%$, $\eta_s = 7\%$; при $T > 1750\text{K}$, $\eta_1 = 6\%$, $\eta_s = 10\%$.

Розрахунок коефіцієнтів в'язкості за рівнянням (3) досить громіздка процедура, яка потребує ряду допоміжних термодинамічних констант. Коефіцієнти в'язкості цезію і рубідію в газовій фазі на ізобарах досить точно апроксимуються поліномами третьої степені:

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

де $\tau = \frac{T}{1000}$, $T = T^* \dots 2000\text{K}$.

Похибка апроксимації менша за 1%, що значно нижче похибок табличних значень в'язкості. Коефіцієнти рівняння (7) приведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Коефіцієнти рівняння (7)

P, кПа	T*, К	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃
		Рубідій				Цезій			
25	850	-157.5	593.6	-225.1	46.5	-114.7	536.5	-174.5	36.0
50	900	-233.6	717.1	-293.2	59.2	-180.0	641.3	-232.3	45.7
100	1000	-298.9	800.2	-327.5	63.5	-247.4	730.9	-271.6	52.2
200	1050	-380.6	891.4	-358.7	51.2	-341.2	861.4	-337.0	54.2
400	1150	-444.2	928.7	-353.2	61.4	-522.1	1139.9	-494.5	95.1
1000	1300	-508.6	923.7	-317.7	51.2	-257.6	501.8	-56.3	0.04
P _s	700	64.0	223.8	-85.5	23.8	59.7	264.9	-103.1	28.4

Висновки

На основі отриманих експериментальних даних встановлено залежності в'язкості пари цезію і рубідію від температури і складу (тиску). Розраховані характерні для цих залежностей перерізи зіткнень атом-атом і відносні перерізу зіткнень атом-молекула. Розроблено таблиці та розрахункові рівняння для в'язкості цезію і рубідію в газовій фазі при $T=700\text{...}2000\text{ K}$ і $P = 1\text{...}1500\text{ кПа}$, 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 Фреццотті, 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