СВОЙСТВА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ВОДА

ГАЗЫ

ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

ЯДЕРНЫЕ СВОЙСВА

Изотопный состав

Сечение захвата нейтронов

Наведенная радиоактивность

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСВА

Плотность

Теплота испарения

Теплоемкость

Теплопроводность

Вязкость

Температура плавления

Температура кипения

Термическое расширение

Изменение объема при плавлении

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСВА

Взаимодействие с газами

Взаимодействие с водой

Взаимодействие с технологическими средами

Взаимодействие с металлами и сплавами

ДОСТУПНОСТЬ, СТОИМОСТЬ

Водяной теплоноситель Вода

Тяжелая вода

t,°C	ρ, ε/cm ³	Ср, кал/(г·град)	λ, 10 ^{—4} кал/(см·с·град)	η, <i>cn</i> 3	Р, атм
0	0,9998	1,0075	13,3	1,788	0,006
100	0,9583	1,007	16,3	0,282	1,033
200	0,8647	1,074	15,7	0,136	15,86
300	0,7125	1,37	12,7	0,091	87,61
370	0,4505	2,68	8,05	0,057	214,68
374,15					225,6

Характеристика	H ₂ O	D ₂ O
Атомный или молекулярный вес	18	20
Плотность при 20 °C, г/см ³	1,0	1,1
Сечение поглощения тепловых нейтронов, σ_a , барн	0,66	2,6· 10-3
Сечение рассеяния тепловых нейтронов, σ_s , барн	44	15

Газовые теплоносители

Углекислый газ

Гелий

Воздух

Азот

Водород

Диссоциирующие газы

Свойства газов при давлении 10⁵ Па

Характеристика	t °C	H ₂	Не	N ₂	CO ₂	Воздух	Ar
Плотность, г/л	0	0,0870	0,173	1,210	1,913	1,293	1,784
	300	0,0415	0,082	0,576	0,905	0,620	0,850
	500	0,0308	0,061	0,427	0,671	0,449	0,627
Удельная теплоемкость,	0	3,39	1,245	0,249	0,197	0,241	0,124
кал/(г.град)	300	3,47	1,245	0,256	0,252	0,250	0,124
Thus (eleptie)	500	3,50	1,245	0,275	0,276	0,261	0,124
Коэффициент	0	4,11	3,42	0,58	0,351	0,577	0,394
теплопроводности, 10 ⁴	300	7,32	5,86	1,07	0,934	1,07	0,716
кал/(см-сек-град)	500	9,24	7,29	1,33	1,311	1,34	0,905
Динамическая вязкость, мкиз	0	83,6	186	167	140	171	211
	300	138	305	277	264	297	369
	500	169	374	339	339	357	452
Сечение поглощения		0,33	0,0068	1,78	0,002	1,4	0,62
тепловых нейтронов, барн							
Образование радиоактивных		H^3				Ar ⁴¹ ,110 <i>ми</i>	Ar^{41} ,
изотопов при облучении		12,26 года,	_			$\mid_{\mathcal{H}}$	110
нейтронами (без учета		$\beta^{-}(0.018)$				$\beta^{-}(1,25)$	мин,
примесей): изотоп, период						$\gamma(1,29)$	$\beta^{-}(1,2)$
полураспада, вид излучения						N^{16} , 8 c, γ	$\gamma(1,29)$
(энергия, M э B $)$						(6,2)	
						O ¹⁹ ,29 сек,	
						β (4,5), γ	
						(1,6);	
						$C^{14},5800$	
						лет	
						β (0,155)	

Возможные диссоциирующие системы

Диссоциирующие системы	Коэффициент увеличения газовой постоянной	Тепловой эффект химической реакции, ккал/моль	Температур-ный диапазон реакции, °C
$N_2O_4 \leftrightarrow 2NO_2$	2	13,7	25-170
$2NO_2 \leftrightarrow 2NO + O_2$	1,5	27,0	140-850
$Al_2Br_6 \leftrightarrow 2AlBr_3$	2	30,0	300-1400
$Al_2Cl_6 \leftrightarrow 2AlCl_3$	2	29,8	200-1100
$Al_2J_6 \leftrightarrow 2AlJ_3$	2	26,4	230-1200
2NOBr↔2NO + Br ₂	1,5	-	25-500
$2NOC1 \leftrightarrow 2NO + Cl_2$	1,5	-	25-900
Al2Cl6+4Al(ж)↔6AlCl	6	263,8	670-1200
Al ₂ Br ₆ +4Al(ж)↔6AlBr	6	282,4	670-1400
Al ₂ J ₆ +4Al(ж) \leftrightarrow 6AlJ	6	196,4	670-1300
HgCl₂+Hg(ж)↔2HgCl	2	70,4	280-700
HgBr₂+Hg(ж)↔2HgBr	2	63,7	250-700
SnCl₄+Sn(ж)↔2SnCl₂	2	38,6	-
$\operatorname{SnBr}_{4} + \operatorname{Sn}(\mathfrak{R}) \longleftrightarrow 2\operatorname{SnBr}_{2}$	2	65,3	-
Ga ₂ Cl ₆ ↔2GaCl ₃	2	20,0	100-1000
$Ga_2^2Br_6 \leftrightarrow 2GaBr_3$	2	18,5	150-1200
Ga ₂ J ₆ ↔2GaJ ₃	2	11,0	250-1300
$Ga_2Cl_6 + 4Ga(ж) \leftrightarrow 6GaCl$	6	58,7	100-1000

Физико-химические свойства диссоциирующих систем N_2O_4 , Al_2Br_6 , Al_2Cl_6 ,

Величина	Диссоциирующие системы					
	N ₂ O ₄	Al_2Br_6	Al ₂ Cl ₆			
Молекулярная масса М, г/моль	92,2	533,46	266,7			
Нормальная температура кипения t_s , °C	21,3	256	193			
Критическая температура $t_{\rm kp}$, °С	158,3	495	352,7			
Критическое давление р, атм	103,3	27,6	26,0			
Критическое давление $\rho_{\text{кр}}$, $\frac{1}{amM}$ Критический объем $V_{\text{кр}}$, $\frac{1}{cM^3}$ /моль	165,3	601,3	504±20			
Теплота испарения $\Delta H_{\text{пол}}$, ккал/кг	99,4	22,3	36			
Температура плавления $t_{\text{пл.}}$ °С	—11	+97	+195 при			
1111,			2,46			
Теплота химической реакции Q_{xp} , <i>ккал/кг</i>			атм			
	149/293	56,3	112			
Тип реакции	$N_2O_4 \leftarrow 2NO_2 \leftarrow 2NO + O_2$	$Al_2Br_{6\rightarrow}^{\leftarrow}2AlBr_{3\rightarrow}^{\leftarrow}2AlBr_3$	$\begin{array}{c c} Al_2Cl_6 \xrightarrow{} \\ -2AlCl_3 \end{array}$			
Температурный диапазон реакции, °С:			,			
1 атм	25 —850	280—1200	200 1000			
100 атм	25 —1200	350—1700	300 —1200			

Органические теплоносители Полифенилы:

дифенил $-C_{12}H_{10}$

терфенил – $C_{18}H_{14}$

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРИ 300°C

Теплоноситель	t	<i>t</i> кип, °С	ρ,	c_{p} ,кал/(г-	λ, 10 ⁻³	η, спз	ρ, атм
	пл,		г/см ³	град)	кал/(см*сек*г		
	°C				рад)		
Вода	0	100	0,7125	1,37	1,270	0,09	87,6
Дифенил	70	256	0,790	0,59	0,237	0,24	2,4
Гидрированный	11	200 —360	0,765	0,82	0,234	0,35	2,35 (при 350°C)
терфенил							
Моноизопропил-	-47	290	0,776	0,64	0,216	0,24	1,25
дифенил							
Даутерм (эвтектическая смесь дифенилоксида	12	258					
$C_{12}H_{10}O$ и бифенила $C_{12}H_{10}$)							
Гептан, С ₇ H ₁₆	-90,6	98					

Жидкие металлы

Термодинамика растворов

Химическая и диффузионная кинетика

Гидродинамика

Теория теплообмена

Теория массообмена

Me-	Li	Na	K	Cs	44K-	77,2	14Na	Pb	Bi	45Pb-	83Pb-	Ga	Sn	Hg
талл					56Na	K-22	-43K			55Bi	1 7 Li			
						,8Na	-43C							
							S							
T.,	180,5	98,0	63,5	28,4	19	-12,6	-78	327,4	271,0	120	234,7	29,8	232	-38,9
о С														
0	0,53	0,97	0,86	1,9	0,87	0,88	1,44	11,3	9,8	10,5	11	5,9	7,3	13,6
ρ,	0,50	0,57	0,00	1,50	0,07	0,00	1,	11,0	7,0	10,5		392	7,50	10,0
Γ/C														
M^3														

ЛИТИЙ Ядерные свойства

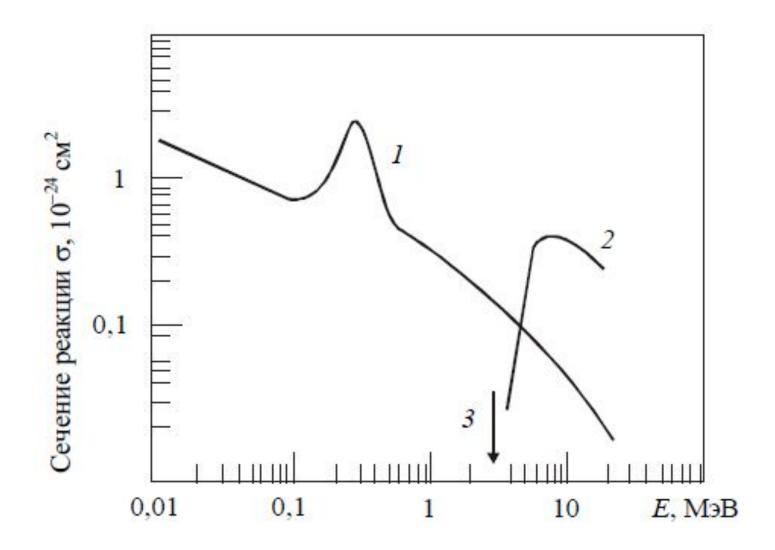
Природный литий состоит из смеси изотопов 6 Li и 7 Li

Содержание лития-6 в природной смеси составляет 7,42%.

Искусственные изотопы 8 Li, 9 Li и 11 Li обладают периодом полураспада соответственно 0,842; 0,176 и 0,0085 с

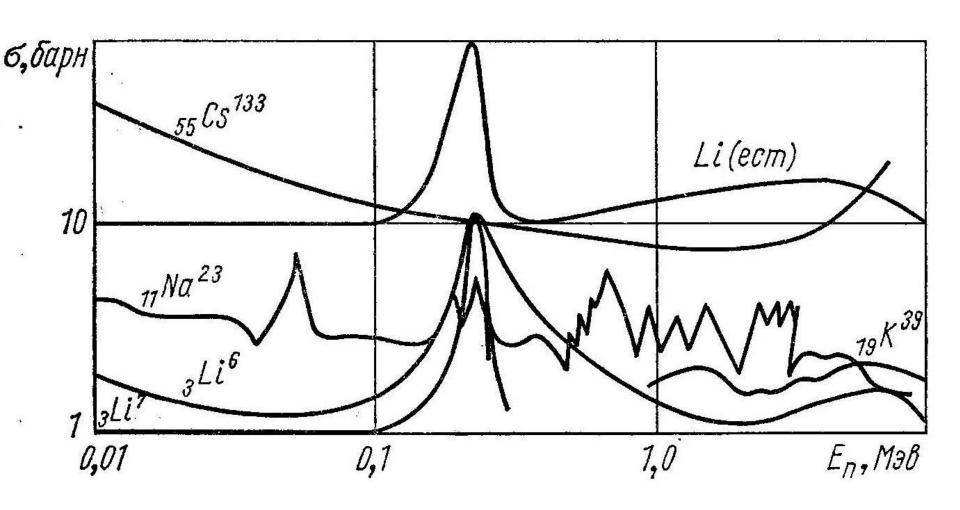
 6 Li(n, α)T + 4,8M $_{2}$ B

 7 Li(n, n' α)T - 2,9M $_{2}$ B.



Сечение реакции 6 Li(n,α)Т (I) и 7 Li($n,n'\alpha$)Т (Z) в зависимости от энергии нейтронов; (Z) - пороговая энергия для реакции ZLi(Z)Т

Сечения захватов щелочных металлов в зависимости от энергии нейтронов



ЛИТИЙ

Физические, теплофизические свойства

Z = 3

Потенциалы ионизации лития

относительно высоки:

I - 5,3918 эВ,

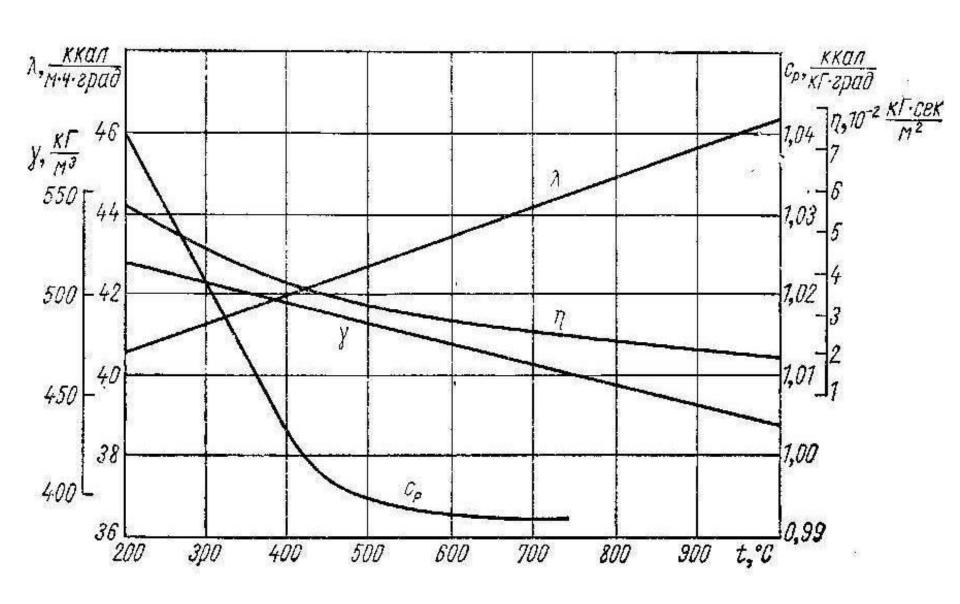
II - 75,641 эВ

III - 122,45 эВ

Основные свойства лития

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	0,53
Температура плавления, °С	180,5
Температура кипения, °С	1327 - 1350
Теплота плавления, кДж/кг	416
Теплота испарения, кДж/кг	21290
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	3282
Теплопроводность, Вт/(м·К)	71
Поверхностное натяжение, мН/м	400
Изменение объема при плавлении, %	1,5

Зависимость свойств лития от температуры



Зависимость давления паров лития от температуры

<i>T</i> , K	300	Тпл	500	700	900	1100	1300	1500
<i>P</i> , Па	9,81·10 ⁻¹⁸	2,408·10 ⁻⁸	1,079·10 ⁻⁶	4,165·10 ⁻²	13,78	537,4	6710	42640

НАТРИЙ

Физические, теплофизические свойства

Z = 11

Потенциалы ионизации натрия:

I - 5,138 3B,

II - 47,20 эВ

III - 71,8 эВ



НАТРИЙ Ядерные свойства

Природный натрий имеет один стабильный изотоп 23 Nа Искусственные изотопы 20 Na, 21 Na, 22 Na, 24 Na и 25 Na обладают периодом полураспада соответственно 0,23 c; 23 c, 2,6 года, 15 часов и 60 с

Основные свойства натрия

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	0,97
Температура плавления, °С	98,0
Температура кипения, °С	878
Теплота плавления, кДж/кг	117
Теплота испарения, кДж/кг	3869
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	1201
Теплопроводность, Вт/(м·К)	150,0
Поверхностное натяжение, мН/м	195
Изменение объема при плавлении, %	2,6

Зависимость давления паров натрия от температуры

T, K	Тпл	500	700	900	1100	
Р, Па	14,32·10-7	8,47·10 ⁻²	96,8	4510	50200	

КАЛИЙ Физические, теплофизические свойства

Z = 19

Потенциалы ионизации калия:

I - 4,339 эВ,

II - 31,81 эВ

III - 45,9 эВ

КАЛИЙ Ядерные свойства

Природный калий является смесью стабильных изотопов 39 K — 93% и 41 K — 7% Калий имеет искусственные изотопы 37 K, 38 K, 42 K, 43 K и 44 K

Массовое	Период	Характер		
число	полураспада	излучения	частиц	ү-квантов
37	1,3 <i>c</i>	eta^+	4,6	
38	7,65 c	β^+, γ	2,53	2,16
39	_	_	_	
40	1,3.10 ⁹ лет	β-, γ, Κ	1,3	1,46
41	_	_	_	_
42	12,4 ч	β-, γ	2,07 (25%) 36 (75%)	1,51
43	22, 4 <i>y</i>	β-, γ	0,24	0,4
44	18 мин	β-	0,81	_

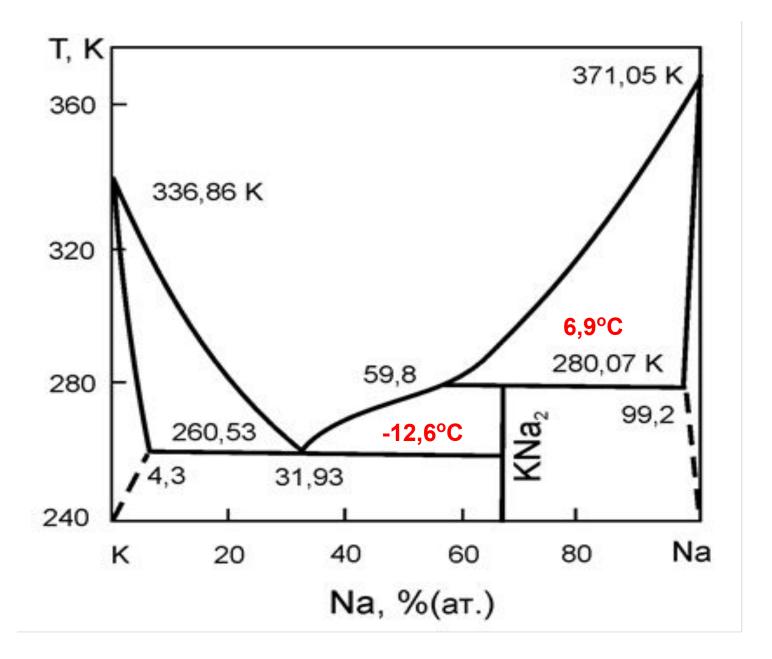
Основные свойства калия

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	0,86
Температура плавления, °С	63,5
Температура кипения, °С	759
Теплота плавления, кДж/кг	59,5
Теплота испарения, кДж/кг	2213
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	739
Теплопроводность, Вт/(м·К)	97,1
Поверхностное натяжение, мН/м	114,1
Изменение объема при плавлении, %	2,5

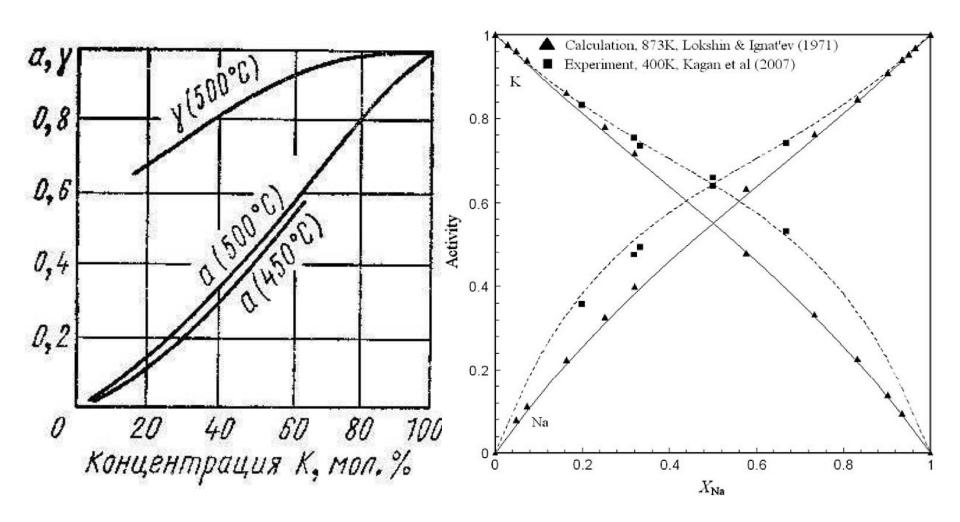
Зависимость давления паров калия от температуры

<i>T</i> , K	Тпл	400	500	700	900	
<i>P</i> , Па	10,6·10 ⁻⁵	15,1·10 ⁻³	2,65	888	21100	

ЭВТЕКТИКА НАТРИЙ – КАЛИЙ 77,2%K – 22,8%Na



Изотермы активности и коэффициента активности в системе Na - K



ЦЕЗИЙ

Физические, теплофизические свойства

Z = 55

Потенциалы ионизации цезия:

I - 3,893 3B,

II - 25,1 эВ

III - 34,6 эВ

ЦЕЗИЙ

Ядерные свойств

Природный цезий состоит из стабильного изотопа ¹³³Cs

Массовое	Период полураспада	Характер		
число		излучения	частиц	ү-квантов
123	6 мин	$oldsymbol{eta}^+$	_	_
125	45 мин	β+,γ	2,03	0,112
126	1,6 мин	β+,γ	3,08	0,385
127	6,3 <i>y</i>	β^+, γ	0,68; 1,06	0,125
128	3,8 мин	β+,Ε, γ	3,0 (70%);	0,135;
			2,5 (30%)	0,29
129	314	Ε, γ	_	0,375; 0,420; 0,585
130	30 мин	β+,Ε, β-	1,97 (β+)	_
			0,442 (β-)	_
131	10 дней	\boldsymbol{E}	_	_
132	6 дней;7,1 дня	E, γ	_	0,668
133	_	_	_	_
134	_	_	_	_
135	3.10 ⁶ u	β-	0,21	_
136	13,7 дня	β-,γ	0,341 (92,6%)	0,9
			0,657 (7,4%)	1,2
137	33 ч	β-	0,51 (92%)	_
	27 ч		1,17 (8%)	_
138	32,9 мин	β-,γ	3,4; 2,9; 2,0	1,2
139	9,7 мин	β-	3,17	_
140	66 c	β-	_	_
141	Короткоживущий	β-	_	_
142	1-2мин			
143	Короткоживущий	β-		_
144	»	β-	_	_
145	»	β-	_	_

Основные свойства цезия

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	1,9
Температура плавления, °С	28,4
Температура кипения, °С	670
Теплота плавления, кДж/кг	16,1
Теплота испарения, кДж/кг	494
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	236
Теплопроводность, Вт/(м·К)	19,0
Поверхностное натяжение, мН/м	60,0
Изменение объема при плавлении, %	2,6

Зависимость давления паров цезия от температуры

<i>T</i> , K	Тпл	400	600	800	1000	
<i>P</i> , Па	2,5·10 ⁻⁶	36,98·10 ⁻²	546	19900	163800	

СВИНЕЦ

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 82$$

Потенциалы ионизации свинца:

I - 7,415 эВ,

II - 15,03 эВ

III - 31,93 эВ

 $IV - 39,0 \ 3B$

СВИНЕЦ Ядерные свойства

Природный свинец является смесью стабильных изотопов 204 Pb - 1,48%, 206 Pb - 23,6%, 207 Pb - 22,6%, 208 Pb - 52,3%,

Свинец имеет 11 искусственных изотопов

²⁰⁸Рв
$$(n,\gamma) \rightarrow$$
 ²⁰⁹Рв $\rightarrow \beta$ ²⁰⁹Ві

209
Bi (n,γ) → 210 Bi → β $^{-210}$ Po

Основные свойства свинца

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	11,3
Температура плавления, °С	327,44
Температура кипения, °С	1745
Теплота плавления, кДж/кг	23,4
Теплота испарения, кДж/кг	920
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	129,5
Теплопроводность, Вт/(м·К)	35,5
Поверхностное натяжение, мН/м	480
Изменение объема при плавлении, %	4,5

Зависимость давления паров свинца от температуры

<i>T</i> , K	Тпл	800	1000	1200	
<i>P</i> , Па	42,08·10 ⁻⁸	5,37·10 ⁻³	1,45	58,86	

ВИСМУТ

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 83$$

Потенциалы ионизации висмута:

I - 7,237 эВ

II - 19,3 эВ

III - 25,6 эВ

ВИСМУТ Ядерные свойства

Природный висмут имеет один стабильный изотоп ²⁰⁹Ві Висмут имеет более 20 искусственных изотопов

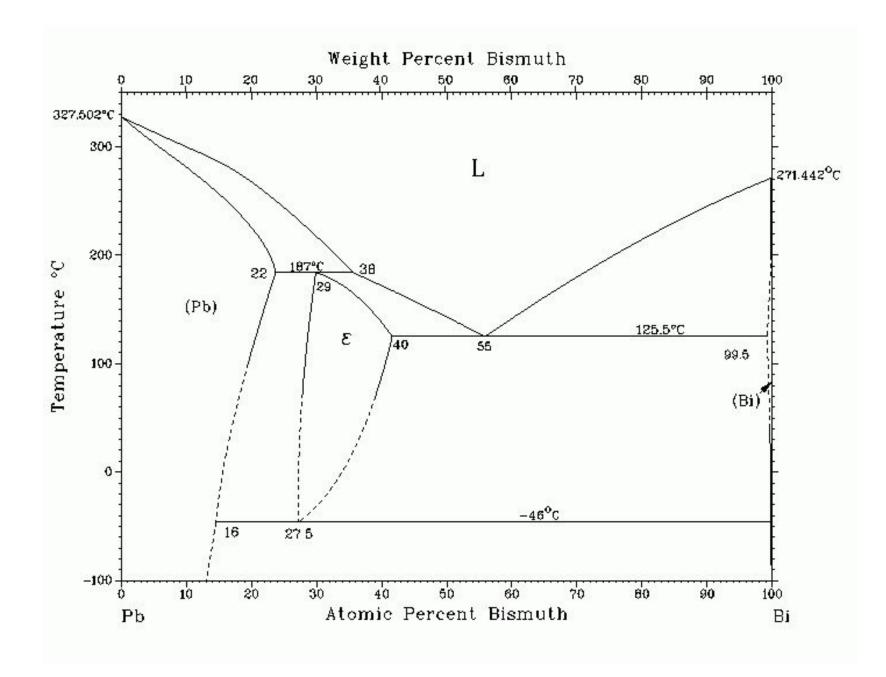
Основные свойства висмута

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	9,8
Температура плавления, °С	271,0
Температура кипения, °С	1557
Теплота плавления, кДж/кг	54,7
Теплота испарения, кДж/кг	897
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	142
Теплопроводность, Вт/(м·К)	7,3
Поверхностное натяжение, мН/м	360
Изменение объема при плавлении, %	~4,5

Зависимость давления паров висмута от температуры

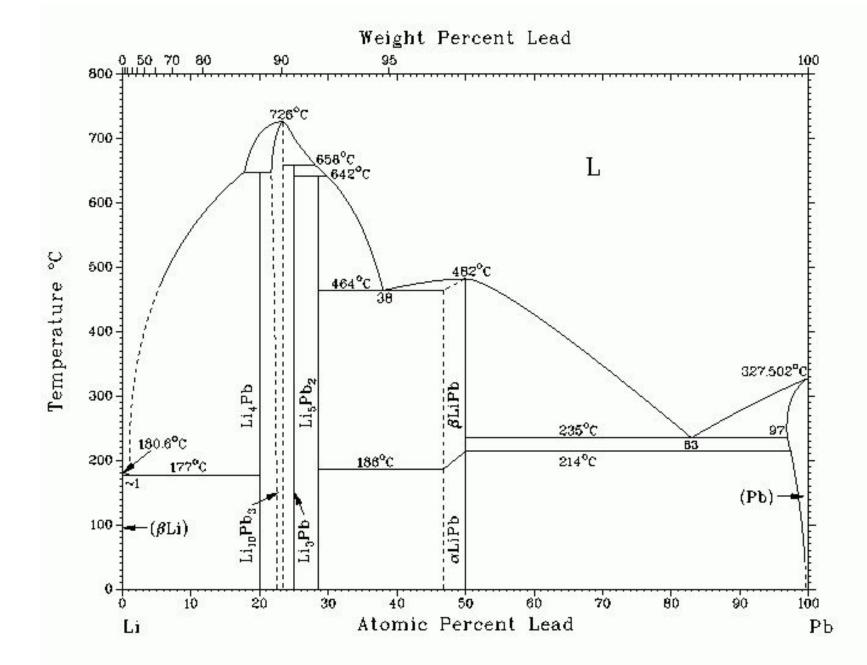
<i>T</i> , K	${ m T}_{ m ext{ iny }}$	850	950	1300	
<i>P</i> , Па	62,52·10 ⁻⁵	47,23·10 ⁻³	81,04·10 ⁻²	133	

ЭВТЕКТИКА СВИНЕЦ— ВИСМУТ 45%Pb – 55%Bi



ЭВТЕКТИКА СВИНЕЦ– ЛИТИЙ 83%Pb – 17%Li

Содержание лития в Li17Pb83 -0,065 г/см 3



Как показали измерения, проведенные с помощью метода Кнудсена и метода определения ЭДС, жидкий раствор Li - Pb, богатый свинцом, показывает сильное отклонение от идеальности. Активность лития в Li17Pb83 составляет по различным данным $1,2\cdot10^{-4}$ при 477° C; $(2,5-9,5)\cdot10^{-4}$ при 527° C; $3,6\cdot10^{-4}$ при 577° C и $(6,0-8,5)\cdot10^{-4}$ при 677° C.

Основные свойства эвтектики 83%Pb – 17%Li

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	9,56
Температура плавления, °С	234,7
Температура кипения, °С	-
Теплота плавления, кДж/кг	29,59
Теплота испарения, кДж/кг	897
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	250
Теплопроводность, Вт/(м·К)	24
Поверхностное натяжение, мН/м	460
Изменение объема при плавлении, %	3,5

Зависимость давления паров эвтектики 83%Pb – 17%Li от температуры

Давление паров Li17Pb83 можно вычислить по формуле

$$P = a_{Li}P_{Li} + a_{Pb}P_{Pb},$$

где a_{Li} , a_{Pb} - активность лития и свинца в Li17Pb83;

 $P_{\mathrm{Li}}, P_{\mathrm{Ph}}$ - давление паров чистых компонентов.

Из-за относительно низкого давления насыщающих паров свинца и низкой активности лития в Li17Pb83 давление паров над этой жидкометаллической средой значительно ниже, чем над чистым литием.

ГАЛЛИЙ

Физические, теплофизические свойства

Z = 31

Потенциалы ионизации галлия:

I - 6,00 ₉B,

II - 20,51 эВ

III - 30,70 эВ

ГАЛЛИЙ **Ядерные свойства**

Природный галлий состоит из двух стабильных изотопов

69
Ga $-$ 61% и 71 Ga $-$ 39%

Галлий имеет 9 искусственных изотопов

 σ = 2,71 барн

Основные свойства галлия

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	5,9
Температура плавления, °С	29,76
Температура кипения, °С	2205
Теплота плавления, кДж/кг	80,2
Теплота испарения, кДж/кг	897
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	399
Теплопроводность, Вт/(м·К)	41
Поверхностное натяжение, мН/м	707
Изменение объема при плавлении, %	-3,2





Зависимость давления паров галлия от температуры

Т, К	Тпл	1200	1300	1473	
<i>P</i> , Па	3,9·10 ⁻³⁷	0,135	0,96	16,80	

ОЛОВО

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 50$$

Потенциалы ионизации галлия:

I - 7,33 эВ,

II - 14,63 эВ

III - 30,70 эВ

ОЛОВО

Ядерные свойства

Природный галлий состоит из десяти стабильных изотопов

$$^{112}Sn - 0.95\%, \, ^{114}Sn - 0.65\%, \, ^{115}Sn - 0.34\%, \, ^{116}Sn - 14.24\%, \, ^{117}Sn - 7.57\%, \, ^{112}Sn - 0.95\%, \, ^{114}Sn - 0.00\%, \, ^{115}Sn - 0.00\%, \, ^{115}Sn - 0.00\%, \, ^{115}Sn - 0.00\%, \, ^{116}Sn - 0.00\%, \, ^{1$$

$$^{118}Sn-24,01\%,\ ^{119}Sn-8,58\%,\ ^{120}Sn-32,97\%,\ ^{122}Sn-4,71\%,\ ^{124}Sn-5,98\%,$$

Олово имеет более 10 искусственных изотопов, достаточно короткоживущих

$$\sigma = 6,26 \cdot 10^{-5}$$
 барн

Основные свойства олова

Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	5,85 (7,23)
Температура плавления, °С	232
Температура кипения, °С	2270
Теплота плавления, кДж/кг	59,56
Теплота испарения, кДж/кг	2446,7
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	222
Теплопроводность, Вт/(м·К)	65
Поверхностное натяжение, мН/м	554
Изменение объема при плавлении, %	2,9

Зависимость давления паров олова от температуры

<i>T</i> , K	Тпл	1200	1300	1521	
<i>P</i> , Па	57,72·10 ⁻²²	1,35·10 ⁻³	0,013	1,33	

СПЛАВЫ ОЛОВО – ЛИТИЙ

