

СВОЙСТВА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ВОДА

ГАЗЫ

ОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

ЖИДКИЕ МЕТАЛЛЫ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА

Изотопный состав

Сечение захвата нейтронов

Наведенная радиоактивность

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Плотность

Теплота испарения

Теплоемкость

Теплопроводность

Вязкость

Температура плавления

Температура кипения

Термическое расширение

Изменение объема при плавлении

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Взаимодействие с газами

Взаимодействие с водой

Взаимодействие с технологическими средами

Взаимодействие с металлами и сплавами

ДОСТУПНОСТЬ, СТОИМОСТЬ

Водяной теплоноситель

Вода

Тяжелая вода

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$C_p, \text{кал/(г}\cdot\text{град)}$	$\lambda, 10^{-4}$ $\text{кал/(см}\cdot\text{с}\cdot\text{град)}$	$\eta, \text{спз}$	$P, \text{атм}$
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_2O	D_2O
Атомный или молекулярный вес	18	20
Плотность при 20 $^\circ\text{C}$, г/см^3	1,0	1,1
Сечение поглощения тепловых нейтронов, σ_a , барн	0,66	$2,6 \cdot 10^{-3}$
Сечение рассеяния тепловых нейтронов, σ_s , барн	44	15

Газовые теплоносители

Углекислый газ

Гелий

Воздух

Азот

Водород

Диссоциирующие газы

Свойства газов при давлении 10^5 Па

Характеристика	t °C	H ₂	He	N ₂	CO ₂	Воздух	Ar
Плотность, <i>г/л</i>	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, <i>кал/(г.град)</i>	0	3,39	1,245	0,249	0,197	0,241	0,124
	300	3,47	1,245	0,256	0,252	0,250	0,124
	500	3,50	1,245	0,275	0,276	0,261	0,124
Коэффициент теплопроводности, 10^4 <i>кал/(см-сек-град)</i>	0	4,11	3,42	0,58	0,351	0,577	0,394
	300	7,32	5,86	1,07	0,934	1,07	0,716
	500	9,24	7,29	1,33	1,311	1,34	0,905
Динамическая вязкость, <i>мкпз</i>	0	83,6	186	167	140	171	211
	300	138	305	277	264	297	369
	500	169	374	339	339	357	452
Сечение поглощения тепловых нейтронов, <i>барн</i>		0,33	0,0068	1,78	0,002	1,4	0,62
Образование радиоактивных изотопов при облучении нейтронами (без учета примесей): изотоп, период полураспада, вид излучения (энергия, <i>МэВ</i>)		H ³ 12,26 года, β^- (0,018)	—			Ar ⁴¹ , 110 ми н β^- (1,25) γ (1,29) N ¹⁶ , 8 с, γ (6,2) O ¹⁹ , 29 сек, β^- (4,5), γ (1,6); C ¹⁴ , 5800 лет β^- (0,155)	Ar ⁴¹ , 110 мин, β^- (1,2) γ (1,29)

Возможные диссоциирующие системы

Диссоциирующие системы	Коэффициент увеличения газовой постоянной	Тепловой эффект химической реакции, <i>ккал/моль</i>	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
$2NOBr \leftrightarrow 2NO + Br_2$	1,5	-	25-500
$2NOCl \leftrightarrow 2NO + Cl_2$	1,5	-	25-900
$Al_2Cl_6 + 4Al(ж) \leftrightarrow 6AlCl$	6	263,8	670-1200
$Al_2Br_6 + 4Al(ж) \leftrightarrow 6AlBr$	6	282,4	670-1400
$Al_2J_6 + 4Al(ж) \leftrightarrow 6AlJ$	6	196,4	670-1300
$HgCl_2 + Hg(ж) \leftrightarrow 2HgCl$	2	70,4	280-700
$HgBr_2 + Hg(ж) \leftrightarrow 2HgBr$	2	63,7	250-700
$SnCl_4 + Sn(ж) \leftrightarrow 2SnCl_2$	2	38,6	-
$SnBr_4 + Sn(ж) \leftrightarrow 2SnBr_2$	2	65,3	-
$Ga_2Cl_6 \leftrightarrow 2GaCl_3$	2	20,0	100-1000
$Ga_2Br_6 \leftrightarrow 2GaBr_3$	2	18,5	150-1200
$Ga_2J_6 \leftrightarrow 2GaJ_3$	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_2O_4	Al_2Br_6	Al_2Cl_6
Молекулярная масса M , г/моль	92,2	533,46	266,7
Нормальная температура кипения t_s , °C	21,3	256	193
Критическая температура $t_{кр}$, °C	158,3	495	352,7
Критическое давление $p_{кр}$, атм	103,3	27,6	26,0
Критический объем $V_{кр}$, см ³ /моль	165,3	601,3	504±20
Теплота испарения $\Delta H_{исп}$, ккал/кг	99,4	22,3	36
Температура плавления $t_{пл}$, °C	—11	+97	+195 при 2,46 атм
Теплота химической реакции Q_{xp} , ккал/кг	149/293	56,3	112
Тип реакции	$N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$	$Al_2Br_6 \rightleftharpoons 2AlBr_3 \rightleftharpoons 2AlBr_3$	$Al_2Cl_6 \rightleftharpoons 2AlCl_3$
Температурный диапазон реакции, °C:			
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 пл, °C	t кип, °C	ρ , г/см ³	c_p , кал/(г- град)	λ , 10^{-3} кал/(см*сек*г град)	η , с/з	ρ , атм
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 терфенил	11	200—360	0,765	0,82	0,234	0,35	2,35 (при 350°C)
Моноизопропил- дифенил	-47	290	0,776	0,64	0,216	0,24	1,25
Даутерм (эвтектическая смесь дифенилоксида $C_{12}H_{10}O$ и бифенила $C_{12}H_{10}$)	12	258					
Гептан, C_7H_{16}	-90,6	98					

Жидкие металлы

Термодинамика растворов

Химическая и диффузионная кинетика

Гидродинамика

Теория теплообмена

Теория массообмена

Металл	Li	Na	K	Cs	44K- 56Na	77,2 K-22 ,8Na	14Na -43K -43C s	Pb	Bi	45Pb- 55Bi	83Pb- 17Li	Ga	Sn	Hg
$T_{пл},$ $^{\circ}C$	180,5	98,0	63,5	28,4	19	-12,6	-78	327,4	271,0	120	234,7	29,8	232	-38,9
$\rho,$ г/с м ³	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

ЛИТИЙ

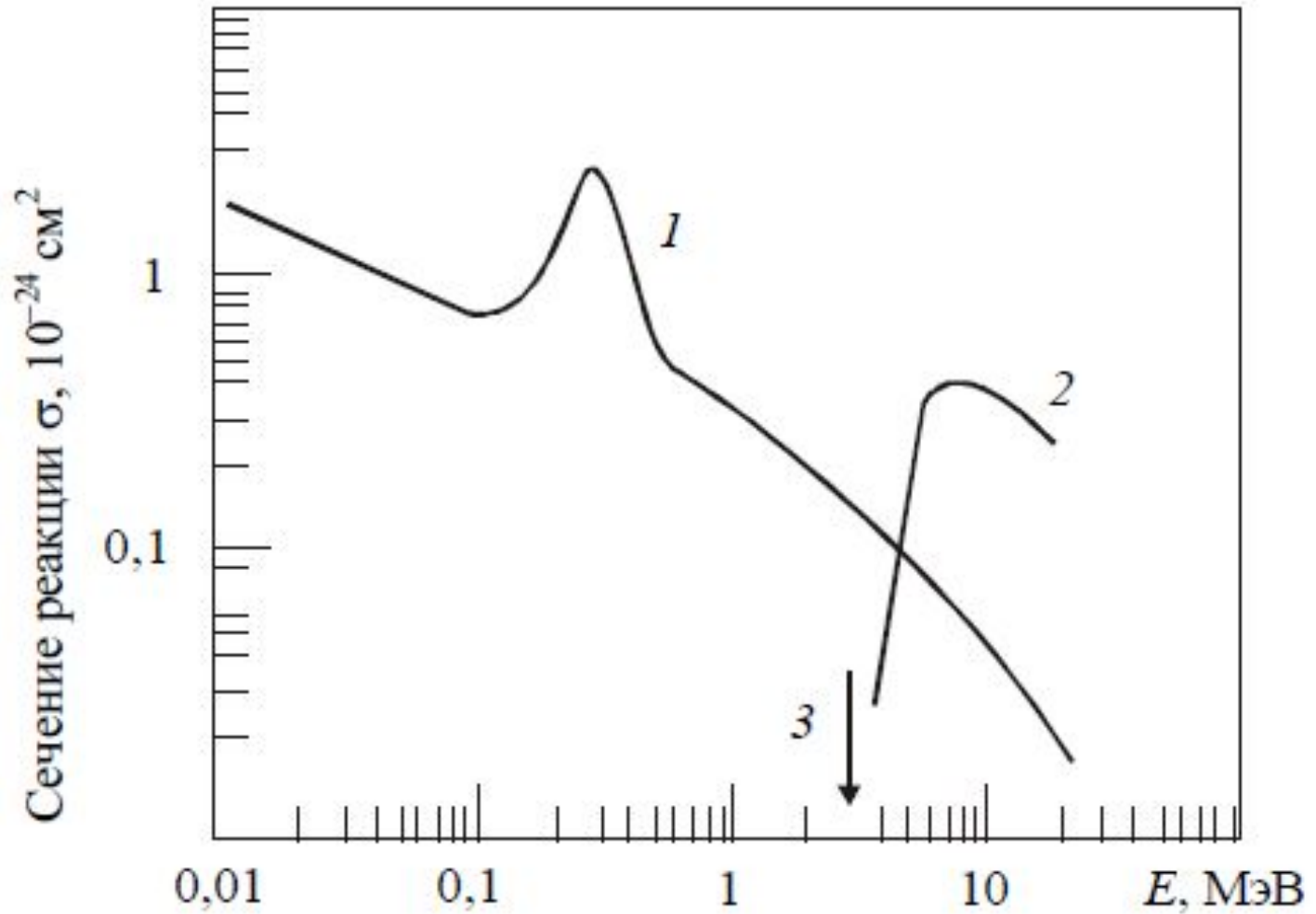
Ядерные свойства

Природный литий состоит из смеси изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

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

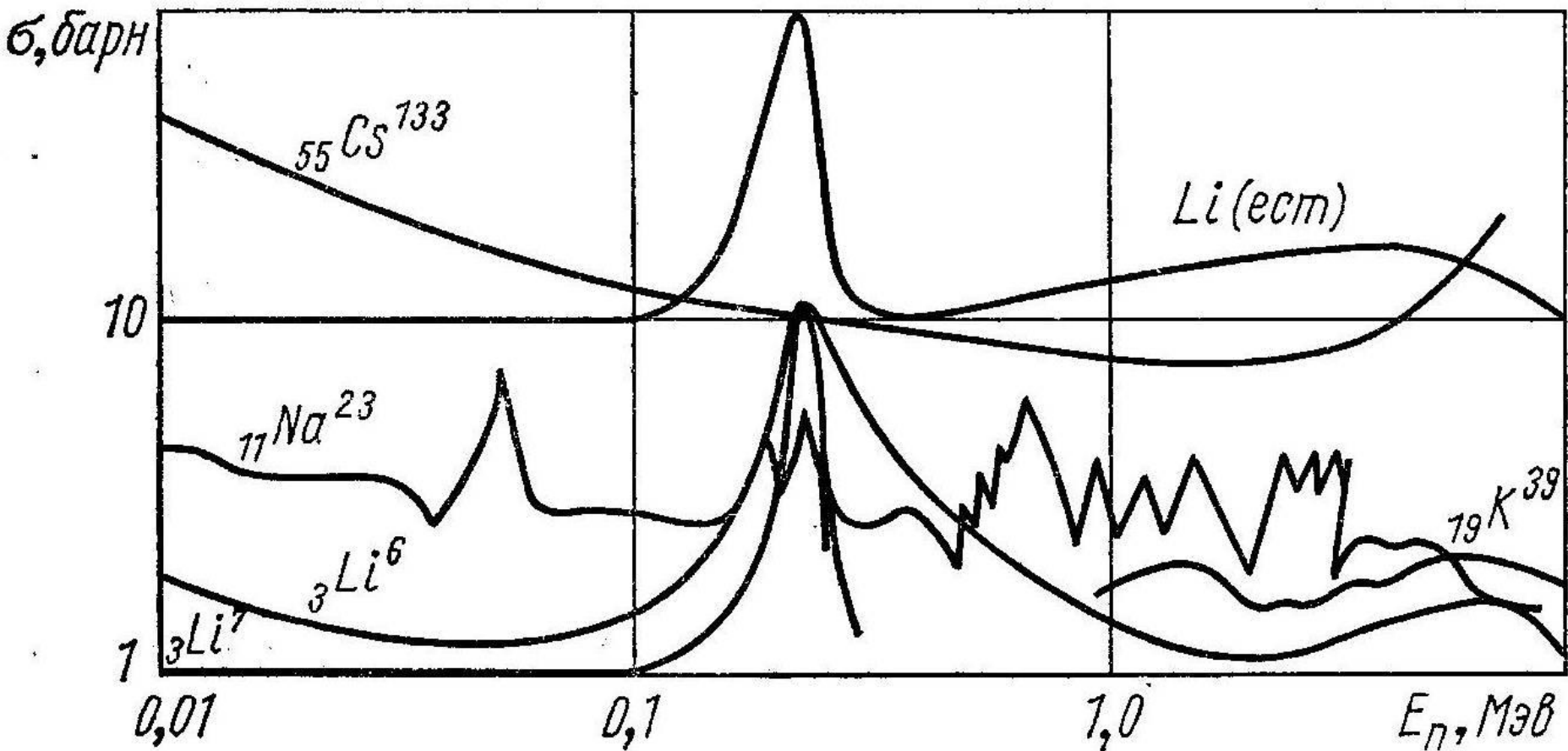
Искусственные изотопы ${}^8\text{Li}$, ${}^9\text{Li}$ и ${}^{11}\text{Li}$ обладают периодом полураспада соответственно 0,842; 0,176 и 0,0085 с





Сечение реакции ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$ (1) и ${}^7\text{Li}(n,n'\alpha)\text{T}$ (2) в зависимости от энергии нейтронов; (3) - пороговая энергия для реакции ${}^7\text{Li}(n,n'\alpha)\text{T}$

Сечения захватов щелочных металлов в зависимости от энергии нейтронов



ЛИТИЙ

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 3$$

Потенциалы ионизации лития

относительно высоки:

I - 5,3918 эВ,

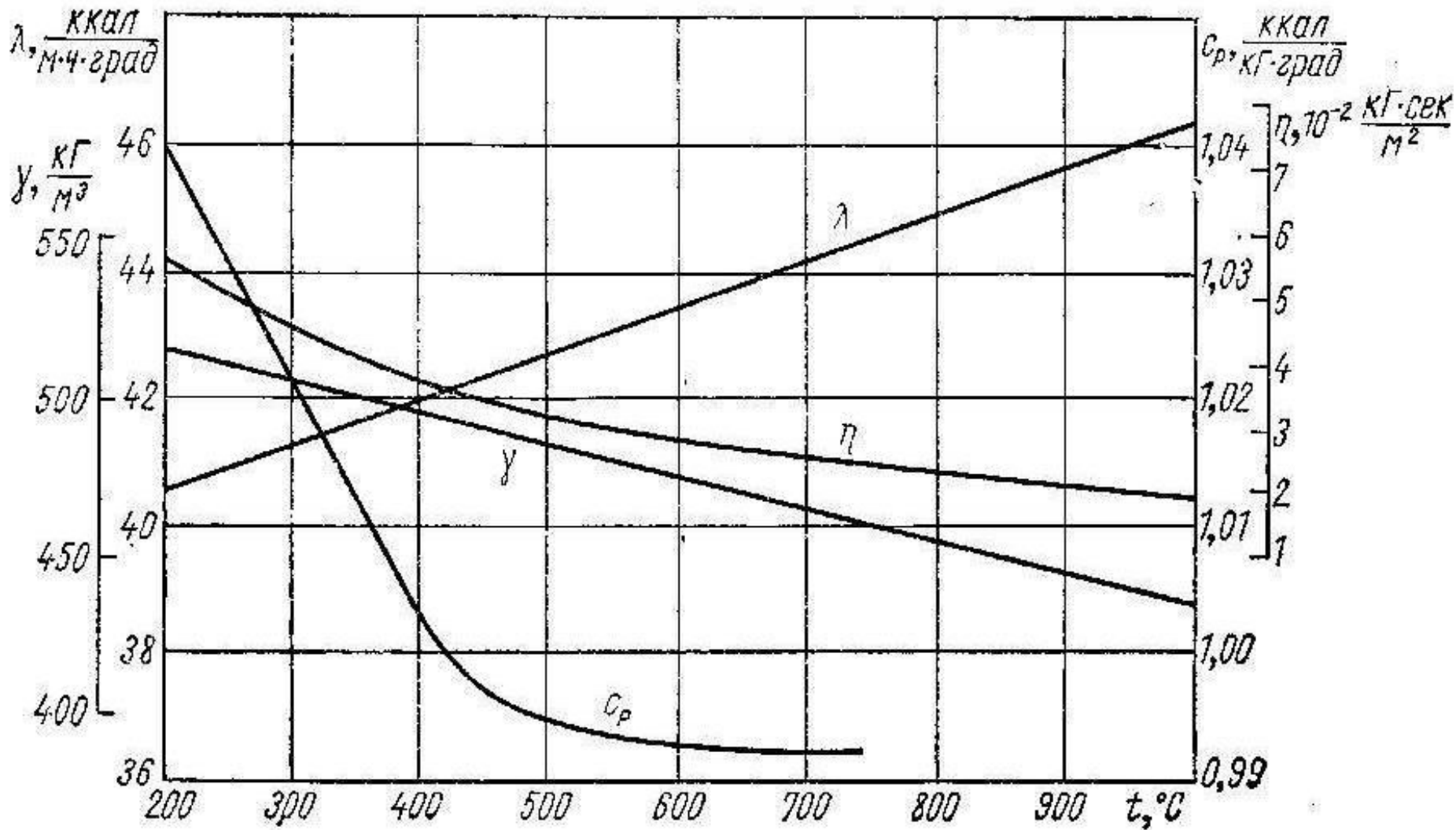
II - 75,641 эВ

III - 122,45 эВ

Основные свойства лития

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	300	$T_{\text{пл}}$	500	700	900	1100	1300	1500
$P, \text{ Па}$	$9,81 \cdot 10^{-18}$	$2,408 \cdot 10^{-8}$	$1,079 \cdot 10^{-6}$	$4,165 \cdot 10^{-2}$	13,78	537,4	6710	42640

НАТРИЙ

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 11$$

Потенциалы ионизации натрия:

I - 5,138 эВ,

II - 47,20 эВ

III - 71,8 эВ



НАТРИЙ

Ядерные свойства

Природный натрий имеет один стабильный изотоп ^{23}Na

Искусственные изотопы ^{20}Na , ^{21}Na , ^{22}Na , ^{24}Na и ^{25}Na обладают периодом полураспада соответственно 0,23 с; 23 с, 2,6 года, 15 часов и 60 с

Основные свойства натрия

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	500	700	900	1100
$P, \text{ Па}$	$14,32 \cdot 10^{-7}$	$8,47 \cdot 10^{-2}$	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 число	Период полураспада	Характер излучения		
			частиц	γ -квантов
37	1,3 с	β^+	4,6	—
38	7,65 с	β^+ , γ	2,53	2,16
39	—	—	—	—
40	$1,3 \cdot 10^9$ лет	β^- , γ , K	1,3	1,46
41	—	—	—	—
42	12,4 ч	β^- , γ	2,07 (25%) 36 (75%)	1,51
43	22, 4 ч	β^- , γ	0,24	0,4
44	18 мин	β^-	0,81	—

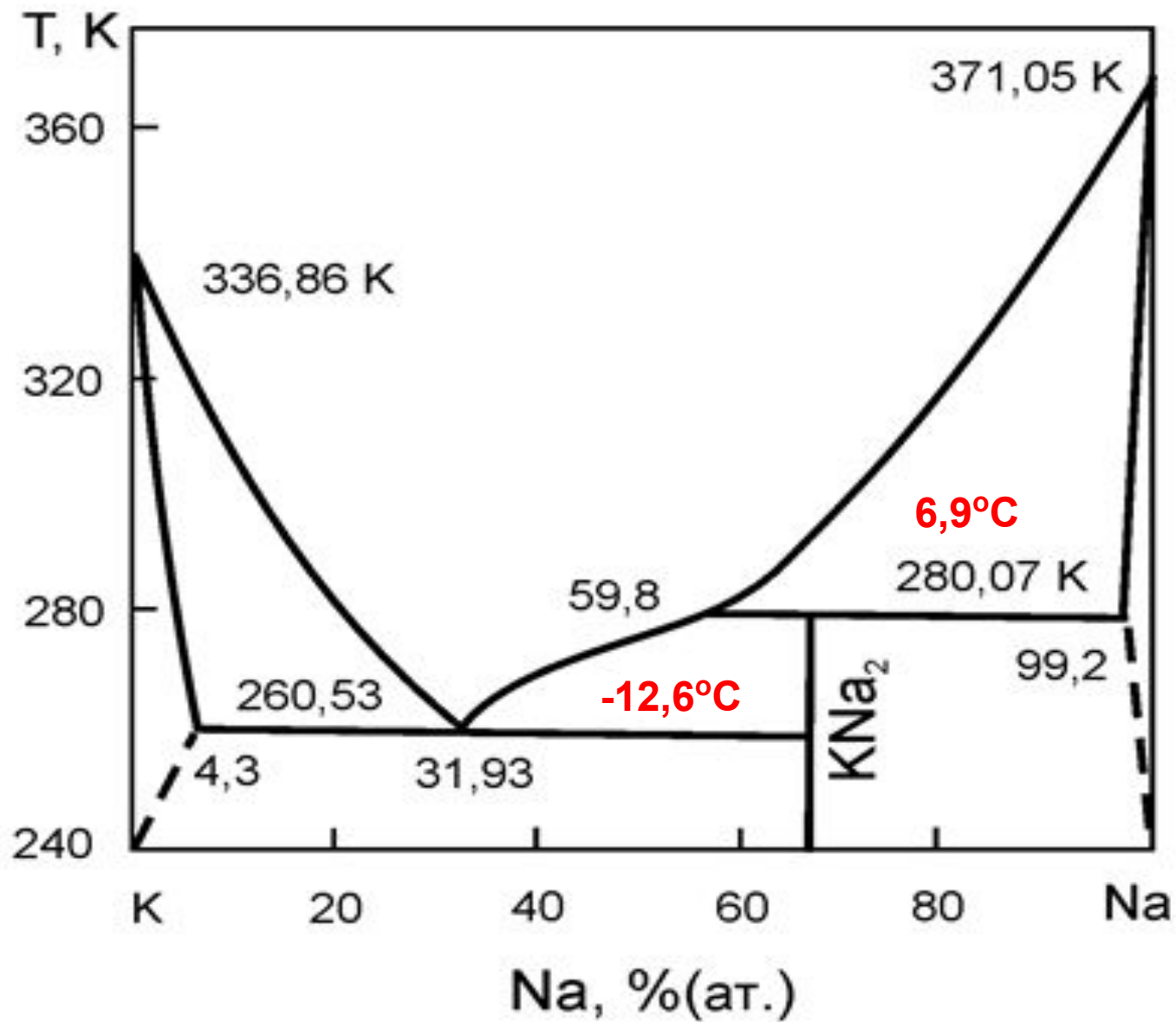
Основные свойства калия

Плотность, г/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

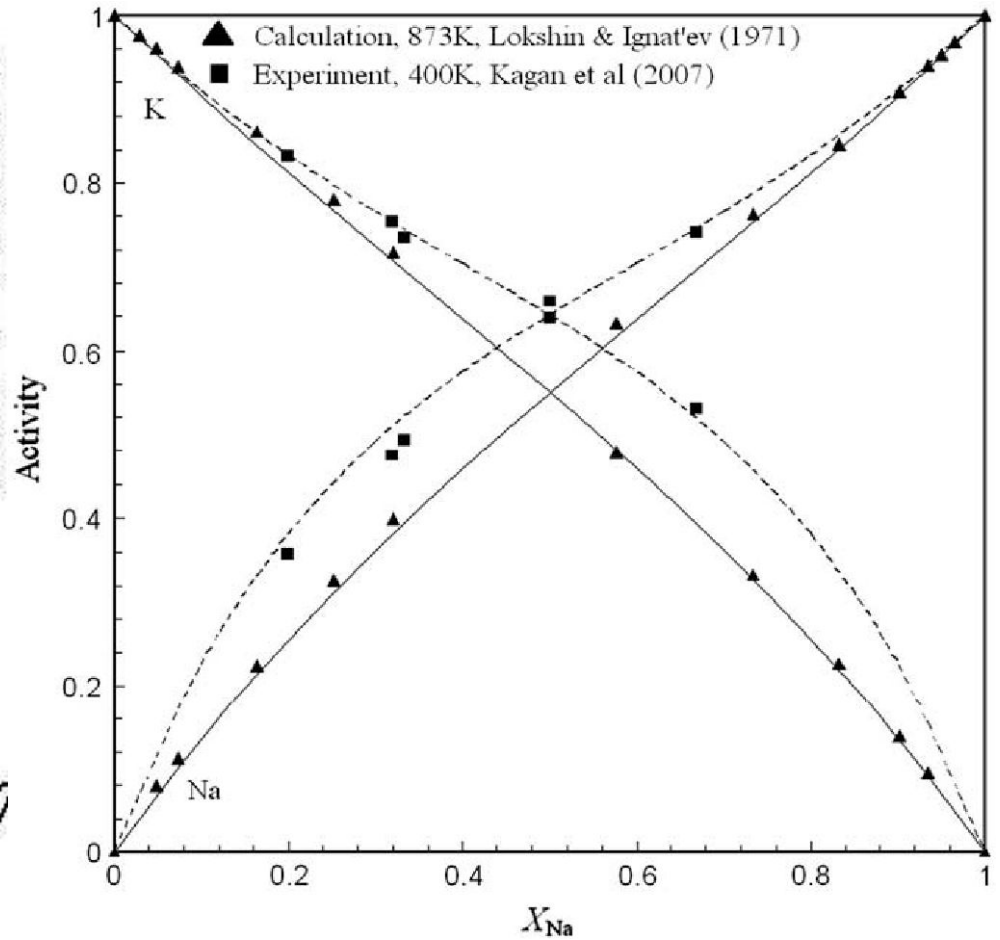
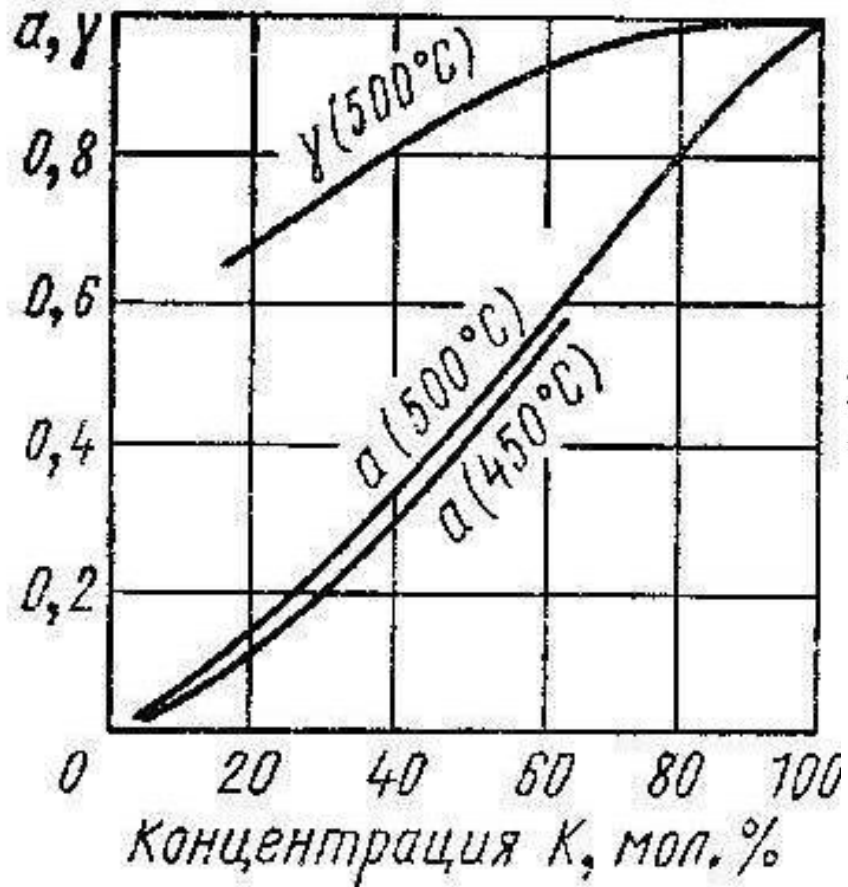
Зависимость давления паров калия от температуры

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	400	500	700	900
$P, \text{ Па}$	$10,6 \cdot 10^{-5}$	$15,1 \cdot 10^{-3}$	2,65	888	21100

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



Изотермы активности и коэффициента активности в системе Na - K



ЦЕЗИЙ

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 55$$

Потенциалы ионизации цезия:

I - 3,893 эВ,

II - 25,1 эВ

III - 34,6 эВ

ЦЕЗИЙ

Ядерные свойств

Природный цезий состоит из стабильного изотопа ^{133}Cs

Массовое число	Период полураспада	Характер излучения		
			частиц	γ -квантов
123	6 мин	β^+	—	—
125	45 мин	β^+, γ	2,03	0,112
126	1,6 мин	β^+, γ	3,08	0,385
127	6,3 ч	β^+, γ	0,68; 1,06	0,125
128	3,8 мин	β^+, E, γ	3,0 (70%); 2,5 (30%)	0,135; 0,29
129	31ч	E, γ	—	0,375; 0,420; 0,585
130	30 мин	β^+, E, β^-	1,97 (β^+) 0,442 (β^-)	— —
131	10 дней	E	—	—
132	6 дней; 7,1 дня	E, γ	—	0,668
133	—	—	—	—
134	—	—	—	—
135	$3 \cdot 10^6$ ч	β^-	0,21	—
136	13,7 дня	β^+, γ	0,341 (92,6%) 0,657 (7,4%)	0,9 1,2
137	33 ч 27 ч	β^-	0,51 (92%) 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 с	β^-	—	—
141	Короткоживущий	β^-	—	—
142	1-2мин			
143	Короткоживущий	β^-	—	—
144	»	β^-	—	—
145	»	β^-	—	—

Основные свойства цезия

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	400	600	800	1000
$P, \text{ Па}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$36,98 \cdot 10^{-2}$	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 эВ

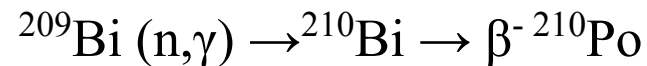
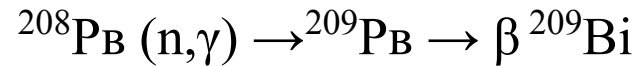
СВИНЕЦ

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



Основные свойства свинца

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	800	1000	1200
$P, \text{ Па}$	$42,08 \cdot 10^{-8}$	$5,37 \cdot 10^{-3}$	1,45	58,86

ВИСМУТ

Физические, теплофизические свойства

$$Z = 83$$

Потенциалы ионизации висмута:

I - 7,237 эВ

II - 19,3 эВ

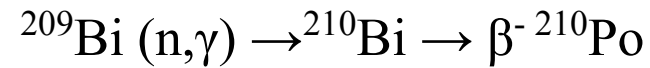
III - 25,6 эВ

ВИСМУТ

Ядерные свойства

Природный висмут имеет один стабильный изотоп ^{209}Bi

Висмут имеет более 20 искусственных изотопов



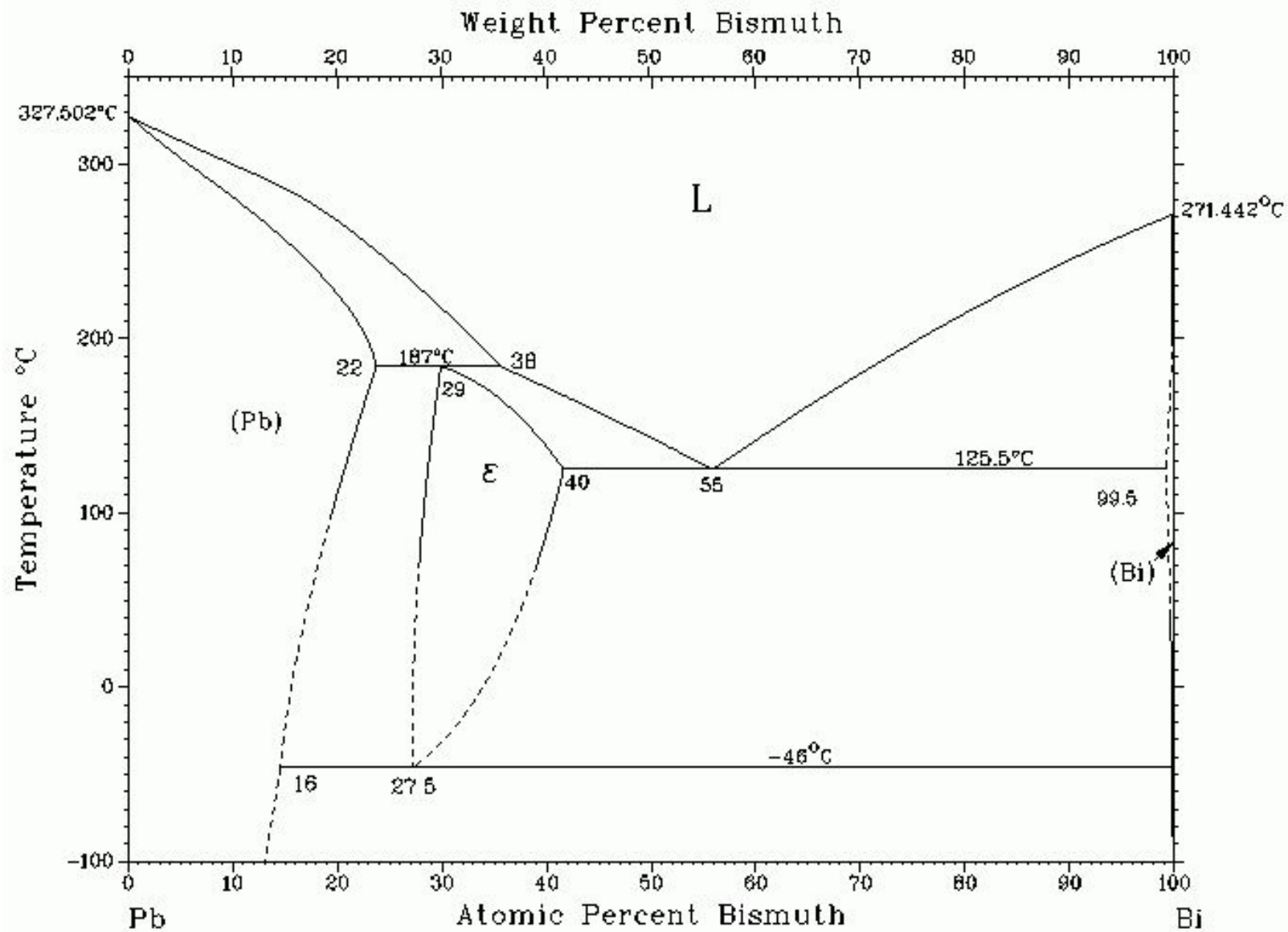
Основные свойства висмута

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	850	950	1300
$P, \text{ Па}$	$62,52 \cdot 10^{-5}$	$47,23 \cdot 10^{-3}$	$81,04 \cdot 10^{-2}$	133

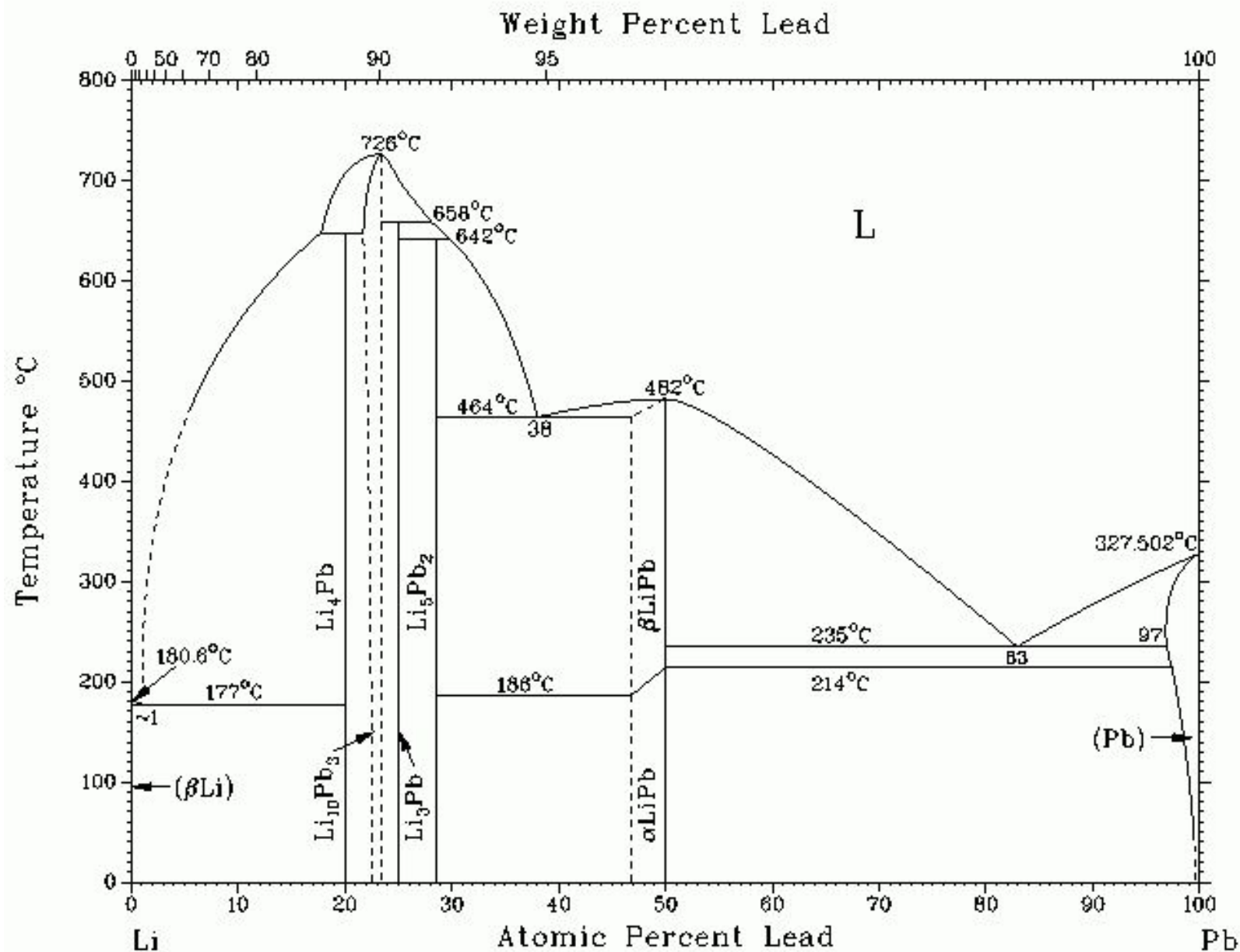
ЭВТЕКТИКА СВИНЕЦ– ВИСМУТ
45%Pb – 55%Bi



ЭВТЕКТИКА СВИНЕЦ– ЛИТИЙ

83%Pb – 17%Li

Содержание лития в Li₁₇Pb₈₃ -0,065 г/см³



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 $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ составляет по различным данным $1,2 \cdot 10^{-4}$ при 477°C ; $(2,5-9,5) \cdot 10^{-4}$ при 527°C ; $3,6 \cdot 10^{-4}$ при 577°C и $(6,0-8,5) \cdot 10^{-4}$ при 677°C .

Основные свойства эвтектики 83%Pb – 17%Li

Плотность, г/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

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

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

P_{Li} , P_{Pb} - 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 эВ,

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

$$\sigma = 2,71 \text{ барн}$$

Основные свойства галлия

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	1200	1300	1473
$P, \text{ Па}$	$3,9 \cdot 10^{-37}$	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

$^{112}\text{Sn} - 0,95\%$, $^{114}\text{Sn} - 0,65\%$, $^{115}\text{Sn} - 0,34\%$, $^{116}\text{Sn} - 14,24\%$, $^{117}\text{Sn} - 7,57\%$,
 $^{118}\text{Sn} - 24,01\%$, $^{119}\text{Sn} - 8,58\%$, $^{120}\text{Sn} - 32,97\%$, $^{122}\text{Sn} - 4,71\%$, $^{124}\text{Sn} - 5,98\%$,

Олово имеет более 10 искусственных изотопов, достаточно короткоживущих

$$\sigma = 6,26 \cdot 10^{-5} \text{ барн}$$

Основные свойства олова

Плотность, г/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

$T, \text{ К}$	$T_{\text{пл}}$	1200	1300	1521
$P, \text{ Па}$	$57,72 \cdot 10^{-22}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$	0,013	1,33

СПЛАВЫ ОЛОВО – ЛИТИЙ

