
УДК 536.21; 541.11

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПРАВИЛА СМЕШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ СВИНЦА С КАЛИЕМ

© 2025 г. С. В. Терехов*

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Россия

**E-mail: svlter@yandex.ru*

Поступила в редакцию: 04.02.2025

После доработки: 12.02.2025

Принята к публикации: 17.02.2025

В теплоотводящих элементах ядерных энергетических установок на быстрых нейтронах в качестве жидкометаллических теплоносителей используют сплавы на основе системы калий-свинец. В связи с практической значимостью данного сплава был проведен полуэмпирический расчет теплофизических характеристик (теплоемкости, коэффициента теплового линейного расширения, плотности, теплопроводности, температуропроводности и удельного электросопротивления) калия, свинца и расплава свинца с калием. Для вычислений были использованы массивы согласованных между собой экспериментальных данных, соотношения авторской модели двухфазной локально-равновесной области и модифицированное правило смешения компонентов. В формировании тепловых свойств компонентов и их сплавов вносят вклад как явления в любой малой окрестности точки образца (локальный уровень), так и коллективные феномены реакций всех точек сплава (субстанциональный уровень). Указано на существование особенностей на температурных зависимостях калия и свинца в виде пиков, ям и скачков, а также на наследование некоторых графических особенностей температурных кривых компонентов при формировании тепловых свойств расплава. С помощью аппроксимации экспериментальных данных расплава установлено исчезновение некоторых особенностей при образовании сплава. На экспериментально неисследованных температурных интервалах продемонстрировано поведение теплофизических характеристик компонентов, а тепловые свойства расплава отображены в виде таблицы. Указано на необходимость проведения дополнительных экспериментальных работ с целью проверки проведенных расчетов и уточнения поведения теплофизических характеристик компонентов и их сплава на неисследованных интервалах температур.

Ключевые слова: калий, свинец, сплав, теплоемкость, коэффициент теплового линейного расширения, плотность, теплопроводность, температуропроводность

DOI: 10.31857/S0235010625020048

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования теплофизических свойств калия, свинца и их сплавов [1–20] связаны с использованием металлов в качестве жидкометаллических теплоносителей в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) [21, 22]. В част-

ности, для ЯЭУ на быстрых нейтронах проекта БРЕСТ в качестве теплоотводящих элементов используют сплавы свинца с калием. Разработку теплоносителей для ЯЭУ новых поколений проводят зачастую путем изменения состава известных сплавов с помощью специальных добавок. Поэтому экспериментальное и теоретическое исследование теплофизических свойств сплавов свинца с калием и их компонентов является перспективной и актуальной задачей, она требует более точных измерений тепловых характеристик как сплавов, так и их компонентов в широком диапазоне температур.

Числовые значения теплофизических характеристик можно получить тремя способами [23]: экспериментальным измерением, вычислением по соотношениям известных общепризнанных моделей или использованием аппроксимационных математических зависимостей. Расхождения в значениях характеристик при их измерении разными авторами (см., например, данные по температуропроводности в [11–13]) обусловлены предварительной подготовкой образца (вакуумирование, термический отжиг, обработка давлением и т. п.), использованием разных типов измерительной аппаратуры и атмосферы в ней, наличием летучих примесей в образце, протеканием в нем кинетических процессов с тепловыми эффектами и т. д. Поэтому возрастает роль теоретического моделирования жидкометаллических систем. Для расчета теплофизических свойств сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$ и его компонентов (по сплавам других составов такие более-менее полные массивы теплофизических результатов в доступной автору научной литературе отсутствуют) отбирались согласующиеся между собой массивы экспериментальных данных [1–10, 15–19].

При описании тепловых свойств вещества в конденсированном состоянии в настоящее время доминирующее положение занимает электрон-фононная теория [24–27]. Она качественно верно описывает изменения теплового состояния вещества, но полученные в ней функциональные зависимости не описывают количественно экспериментальные факты. Так, модели Эйнштейна, Дебая и их версии не объясняют рост теплоемкости при увеличении температуры, наличие скачков и других особенностей на температурных зависимостях теплоемкости. Модели теплопроводности описывают наличие ее пика вблизи абсолютного нуля как результат взаимодействия электронов с примесями [25]. Однако пик может отображать протекание кинетического процесса с тепловым эффектом как в отдельно взятой квазичастичной подсистеме, так и в их совокупности. Другими словами, пик порождается чередой перекрывающихся фазовых переходов в подсистемах металлов и их сплавов. Несмотря на недостатки количественного описания, физико-математическая имитация является предпочтительной при описании конденсированного состояния вещества.

Зачастую экспериментальные данные сглаживаются степенными функциями [11–19, 28]. Такой подход ограничен применением аппроксимационных выражений на конечных температурных интервалах и не дает возможности спрогнозировать изменения характеристик вне указанных диапазонов температур. Применение методов молекулярной динамики (см., например, [29]) лимитируется неизвестными потенциалами межчастичных взаимодействий, использованием циклических граничных условий, невозможностью описания скачков и других особенностей непрерывными функциями на температурных зависимостях теплофизических величин. Поэтому возникает необходимость использования новых подходов при моделировании тепловых характеристик вещества.

Одной из основных проблем при расчете теплофизических свойств вещества является описание их поведения одной непрерывной функцией на интервале температур от абсолютного нуля до температуры испарения, а также проведение согласованных между собой вычислений в рамках одной методической схемы. В работе [30] была предложена модель двухфазной локально-равновесной области, которая затем была успешно применена для расчета теплоемкостей и коэффициентов теплового линейного расширения различных веществ [31–34] в диапазоне температур от абсолютного нуля до температуры испарения. Следует отметить, что предложенная модель позволяет описывать особенности на температурных зависимостях теплофизических свойств [35]: конечные скачки; пики, ямы и их чередование. Так как теплофизические характеристики (теплоемкость C , Дж/(моль·К); коэффициент теплового линейного (объемного) расширения α_L (α_V), К⁻¹; плотность ρ , кг/м³; теплопроводность λ , Вт/(м·К) и температуропроводность a , м²/с) связаны между собой определенными соотношениями, то для их расчета можно использовать температурные функции, полученные в рамках модели [30–35].

Таким образом, целью данной работы является использование согласованных между собой экспериментальных данных для калия и свинца, модифицированного правила смешения компонентов и температурных функций модели двухфазной локально-равновесной области для полуэмпирического феноменологического расчета теплофизических свойств сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$ и его компонентов в диапазоне температур от абсолютного нуля до температуры испарения, а также теоретическая проверка эффекта наследования свойств компонентов при образовании сплава.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Теплоемкость

Согласно модели двухфазной локально-равновесной области, теплоемкость вещества описывается формулой [32–35]

$$C = C_b + C_k. \quad (1)$$

Первое слагаемое в (1)

$$C_b = k_1(T) + \sum_j k_{2j}(T)x_j \quad (2)$$

определяет вклад в теплоемкость электронного газа, фононной и других квазичастичных подсистем. Будем считать коэффициенты $k_1(T)$ и $k_{2j}(T)$ линейными функциями температуры: $k_1(T) = k_{10} + k_{11}T$, $k_{2j}(T) = k_{20j} + k_{21j}T$. Формула (2) описывает базисную линию теплоемкости, при этом второе слагаемое в (2) задает также возможные скачки (структурные превращения) на кривой теплоемкости. Постоянный коэффициент k_{11} , Дж/(моль К) определяет тангенс угла наклона участков прямолинейного роста вблизи абсолютного нуля и при высоких температурах. Постоянные коэффициенты k_{20j} , Дж/(моль К²) связаны с вкладом в теплоемкость явлений упорядочения в подсистеме j , отсутствие этого индекса указывает на то, что вто-

рое слагаемое в (2) описывает феномены в фононной подсистеме. Теплоемкость по формуле (2) вычисляется при температуре T [К] и в подсистеме j объемной доле упорядочивающейся фазы x_j , равной

$$x_j = \{1 - \text{th}(b_j[T_{xj}/T - 1])\} / 2. \quad (3)$$

Величина постоянного безразмерного коэффициента b_j в равенстве (3) определяется энтальпией процесса упорядочения и температурой T_{xj} , при которой составы сосуществующих фаз равны между собой. При достаточно больших значениях параметра b_j второе слагаемое в (2) описывает скачок (структурное превращение) на базисной линии теплоемкости.

Второе слагаемое в (1)

$$C_k = \sum_j k_{3j}(T)u_j \quad (4)$$

связано с вкладом в теплоемкость кинетических процессов, внутренней перестройки и фазовых переходов (пики и ямы с округлыми и острыми вершинами, а также их чередование на базисной кривой теплоемкости); $k_{3j}(T) = k_{30j} + k_{31j}T$, Дж/(моль К), k_{30j} и k_{31j} – константы, $u_j = dx_j/dT$. Аппроксимационные функции для расчета теплоемкостей и других теплофизических характеристик калия и свинца приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Коэффициент теплового линейного (объемного) расширения [КТЛР (КТОР)]

Вследствие связи между теплоемкостью и КТЛР в виде второго правила Грюнайзена [36, с.14], КТЛР рассчитывался по формуле:

$$\alpha_L \cdot 10^6 = q_1(T) + \sum_j q_{2j}(T)x_j + \sum_j q_{3j}(T)u_j, \quad (5)$$

где q_1 , q_{2j} и q_{3j} – постоянные коэффициенты приведены в табл. 1 и 2. Отметим, что КТОР α_V связан с КТЛР α_L приближенным равенством (см., например, [37, с.46])

$$\alpha_V \approx 3\alpha_L. \quad (6)$$

Плотность

Плотность массы единичного объема металлов и сплавов зависит от массы образующих атомов, их кристаллографического структурирования и взаимодействия между собой. Вычисление плотностей калия К (атомная масса $M_{a1} = 39.098 \cdot 10^{-3}$, кг/моль) и свинца Pb ($M_{a2} = 207.2 \cdot 10^{-3}$, кг/моль) проводились по модифицированным формулам [38]

$$d = d_0[1 + \alpha_V(293 - T)] + \Delta d(T), \quad (7)$$

где параметры приведены в табл.1 и 2.

Таблица 1. Параметры модели двухфазной локально-равновесной области для расчета теплофизических характеристик калия К и свинца Рb

Функция
<p>Теплоемкость</p> $C = 0.0025 \cdot T + 32.3 \cdot x + T \cdot [0.43 \cdot u_1 + 3.6 \cdot u_2 + 61 \cdot u_3]; x = \{1 - \text{th}[0.82 \cdot (35 / T - 1)]\} / 2;$ $u_1 = dx_1 / dT; x_1 = \{1 - \text{th}[7.8 \cdot (336.53 / T - 1)]\} / 2;$ $u_2 = dx_2 / dT; x_2 = \{1 - \text{th}[2 \cdot (435 / T - 1)]\} / 2;$ $u_3 = dx_3 / dT; x_3 = \{1 - \text{th}[0.7 \cdot (5900 / T - 1)]\} / 2$
<p>КТЛР</p> $\alpha_L \cdot 10^6 = 87 \cdot y + T \cdot [3 \cdot v_1 + 4.6 \cdot v_2 + 2 \cdot v_3]; y = \{1 - \text{th}[0.67 \cdot (40 / T - 1)]\} / 2;$ $v_1 = dy_1 / dT; y_1 = \{1 - \text{th}[2.4 \cdot (240 / T - 1)]\} / 2;$ $v_2 = dy_2 / dT; y_2 = \{1 - \text{th}[3.7 \cdot (320 / T - 1)]\} / 2;$ $v_3 = dy_3 / dT; y_3 = \{1 - \text{th}[1.7 \cdot (336.65 / T - 1)]\} / 2$
<p>Плотность</p> $d = 869 \cdot [1 + 4.1 \cdot \alpha_L \cdot 10^{-6} \cdot (293 - T)] - 30 \cdot x_d; x_d = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (336.65 / T - 1)]\} / 2$
<p>Теплопроводность</p> $\lambda = 0.026 \cdot T + 99 \cdot z - 43 \cdot z_1 + 2688.2 \cdot T \cdot w_2 - 0.0456 \cdot T \cdot z_1;$ $z = \{1 - \text{th}[1.7 \cdot (12 / T - 1)]\} / 2;$ $z_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (336.65 / T - 1)]\} / 2; w_2 = dz_2 / dT; z_2 = \{1 - \text{th}[2.6 \cdot (6 / T - 1)]\} / 2$
<p>Удельное электросопротивление</p> $\rho = 0.002 \cdot T + 4 \cdot s - 12 \cdot s_1 + 386 \cdot T \cdot p_2 + 0.047 \cdot T \cdot s_1; s = \{1 - \text{th}[0.56 \cdot (480 / T - 1)]\} / 2;$ $s_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (336.86 / T - 1)]\} / 2; p_2 = ds_2 / dT;$ $s_2 = \{1 - \text{th}[1.2 \cdot (3500 / T - 1)]\} / 2$

Теплопроводность

Теплопроводность характеризует распространение тепла в материале. При температурах, близких к абсолютному нулю, температурная зависимость теплопроводности характеризуется пиком. Его можно смоделировать функцией вида (4) или суммой таких функций. Теплопроводности калия К и свинца Рb вычислялись по формулам из табл. 1 и 2

$$\lambda = g_1(T) + \sum_j g_{2j}(T)x_j + \sum_j g_{3j}(T)u_j. \quad (8)$$

Таблица 2. Параметры модели для расчета подгоночной функции $f(T)$

Функция
<p>Теплоемкость</p> $C = 0.0026 \cdot T + 31.6 \cdot x + T \cdot [1.6 \cdot u_1 + 0.14 \cdot u_2]; x = \{1 - \text{th}[0.77 \cdot (27 / T - 1)]\} / 2;$ $u_1 = dx_1 / dT; x_1 = \{1 - \text{th}[1.8 \cdot (600.61 / T - 1)]\} / 2;$ $u_2 = dx_2 / dT; x_2 = \{1 - \text{th}[14.6 \cdot (790 / T - 1)]\} / 2$
<p>КТЛР</p> $\alpha_L \cdot 10^6 = 0.0086 \cdot T + 31.8 \cdot y + T \cdot [-0.8 \cdot v_1 + 1.2 \cdot v_2]; y = \{1 - \text{th}[0.8 \cdot (26 / T - 1)]\} / 2;$ $v_1 = dy_1 / dT; y_1 = \{1 - \text{th}[4.6 \cdot (600.61 / T - 1)]\} / 2;$ $v_2 = dy_2 / dT; y_2 = \{1 - \text{th}[5.2 \cdot (790 / T - 1)]\} / 2$
<p>Плотность</p> $d = 11350 \cdot [1 + 2.85 \cdot \alpha_L \cdot 10^{-6} \cdot (293 - T)] - 340.4 \cdot x_d;$ $x_d = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (600.61 / T - 1)]\} / 2$
<p>Теплопроводность</p> $\lambda = 43.6 \cdot z - 16 \cdot z_1 + T \cdot [2700 \cdot w_2 + 134.6 \cdot w_3 + 5.6 \cdot w_4 - 0.008 \cdot z_5];$ $z = \{1 - \text{th}[0.86 \cdot (5 / T - 1)]\} / 2; z_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (600.61 / T - 1)]\} / 2;$ $w_2 = dz_2 / dT; z_2 = \{1 - \text{th}[3.6 \cdot (2.9 / T - 1)]\} / 2;$ $w_3 = dz_3 / dT; z_3 = \{1 - \text{th}[1.6 \cdot (10 / T - 1)]\} / 2;$ $w_4 = dz_4 / dT; z_4 = \{1 - \text{th}[3.1 \cdot (1100 / T - 1)]\} / 2; z_5 = \{1 - \text{th}[6.2 \cdot (100 / T - 1)]\} / 2$
<p>Удельное электросопротивление</p> $\rho = 0.06 \cdot T + 24 \cdot s + 46 \cdot s_1 + T \cdot [2 \cdot p_2 - 0.6 \cdot p_3 - 1.4 \cdot p_4 - 0.023 \cdot s_5];$ $s = \{1 - \text{th}[2 \cdot (480 / T - 1)]\} / 2; s_1 = \{1 - \text{th}[2000 \cdot (600.61 / T - 1)]\} / 2;$ $p_2 = ds_2 / dT; s_2 = \{1 - \text{th}[1.4 \cdot (270 / T - 1)]\} / 2;$ $p_3 = ds_3 / dT; s_3 = \{1 - \text{th}[6 \cdot (500 / T - 1)]\} / 2;$ $p_4 = ds_4 / dT; s_4 = \{1 - \text{th}[3.3 \cdot (945 / T - 1)]\} / 2; s_5 = \{1 - \text{th}[0.8 \cdot (789 / T - 1)]\} / 2$

Температуропроводность

По определению температуропроводность рассчитывалась по формуле [39, С. 8]

$$a = \lambda / (c \cdot d), \quad (9)$$

где λ – теплопроводность, $c = C/M_a$ – удельная теплоемкость, M_a , 10^{-3} [кг/моль] – атомная (молекулярная) масса металла (расплава), d – плотность.

Удельное электросопротивление

Исходя из развитого подхода, аппроксимационная функция для расчета удельного электросопротивления была выбрана в виде

$$\rho \cdot 10^8 = s_1(T) + \sum_j s_{2j}(T)x_j + \sum_j s_{3j}(T)u_j. \quad (10)$$

Модифицированное правило смешения.

Для проведения феноменологического расчета теплофизических характеристик бинарного сплава воспользуемся правилом смешения его компонентов [25]. Для получения сплава заданного состава со значением теплового свойства $A_s(T)$ из компонентов с характеристиками $A_i(T)$ и мольными n_i (массовыми m_i , $i = 1, 2$) долями правило смешения компонентов имеет вид:

$$A_s(T) = n_1 A_1(T) + n_2 A_2(T). \quad (11)$$

Формула (11) для большинства сплавов дает довольно грубое приближение к экспериментальным данным о теплофизических свойствах сплава, поэтому предлагается ее изменение в виде

$$A(T) = A_s(T) + f(T), \quad (12)$$

здесь $f(T)$ — подгоночная функция.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 3 приведены экспериментальные данные и результаты расчета теплоемкостей калия и свинца по формулам (1)–(4) с учетом табл. 1 и 2. Из табл. 3 видно, что теоретические значения теплоемкостей компонентов отличаются от большинства экспериментальных величин не более, чем на 5 %. На рис. 1 показаны температурные зависимости КТЛР калия и свинца. В табл. 4 отображены экспериментальные данные и результаты расчета плотностей калия и свинца по формулам из табл. 1 и 2 соответственно.

В табл. 5 представлены экспериментальные данные и результаты расчета теплопроводностей калия и свинца по формулам из табл. 1 и 2 соответственно. На рис. 2 изображены пики теплопроводностей вблизи абсолютного нуля, а на рис. 3 и 4 — графики температурных функций температуропроводностей и удельных электросопротивлений компонентов исследуемого сплава, рассчитанные по формулам из табл. 1 и 2.

Воспользуемся формулами (11) и (12) для аппроксимации экспериментальных данных из работ [14, 15]. В табл. 6 собраны экспериментальные и расчетные данные по теплофизическим свойствам сплава $K_{9.3}Pb_{90.7}$ (молекулярная масса сплава рассчитывалась по формуле (11) с дополнительным слагаемым 12.43). Теплофизические свойства сплава (при $n_1=0.093$, $n_2=0.907$) вычислялись по формуле (12).

Теплоемкость: $f(T) = -0.0046 \cdot T \cdot x_c + 5.0$, $x_c = \{1 - \text{th}(3.8 \cdot [900 / T - 1])\} / 2$.

Из табл. 6 видно, что на расчетную кривую достаточно неплохо укладываются экспериментальные данные [14].

Плотность: $f(T) = 0$, что соответствует формуле (11). Из табл. 6 видно, что результаты вычислений адекватны данным [15].

Таблица 3. Теплоемкости C , Дж/(моль · К) калия и свинца

T, K	Калий				Свинец					
	[1]	[3]	[4]	Расчет	[1]	[2]	[4]	[9]	[10]	Расчет
20	—	—	9.81	7.36	—	11.00	10.98	10.98	—	11.69
40	—	—	19.31	17.90	—	19.56	19.56	19.56	—	19.78
80	—	—	23.85	23.31	—	23.62	23.62	23.62	—	23.43
100	24.67	—	—	24.28	24.20	24.45	—	24.45	24.20	24.11
150	—	—	26.04	25.54	—	25.28	25.28	25.28	—	25.02
200	26.82	—	—	26.45	25.53	25.90	—	25.90	25.53	25.52
250	—	—	28.03	27.80	—	26.31	26.31	26.31	—	25.89
300	29.68	29.95	—	30.30	26.42	26.94	—	26.94	26.42	26.25
350	—	32.06	—	32.21	—	—	—	29.42	—	26.77
400	31.55	31.55	31.47	31.59	27.52	27.35	27.77	—	27.52	27.51
500	30.73	30.73	—	30.74	28.51	28.39	—	—	28.51	29.05
600	30.14	30.18	30.11	30.08	29.44	29.42	29.84	—	29.44	29.51
700	—	29.87	—	29.78	—	—	—	—	—	29.34
800	29.83	29.83	—	29.75	29.69	—	—	—	29.69	29.73
900	—	—	—	29.94	—	—	—	—	—	29.30
1000	30.73	—	30.97	30.36	29.03	—	29.42	—	29.03	29.00

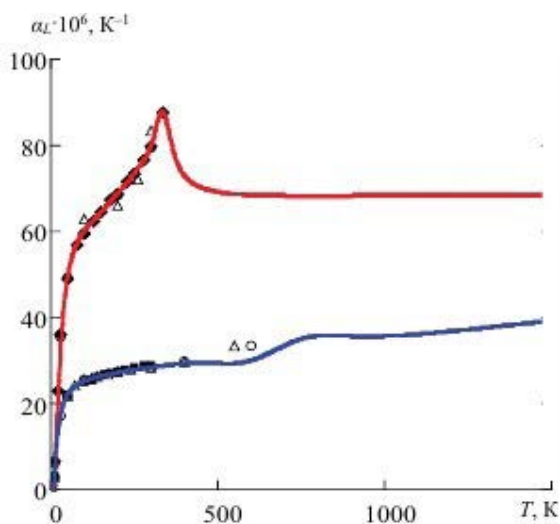


Рис. 1. Температурные зависимости КТЛР калия (красная линия) и свинца (синяя линия): Δ — данные [2], \circ — [4], \blacklozenge — [6], \blacksquare — [9].

Таблица 4. Плотности ρ , кг/м³ калия и свинца

T, K	Калий				Свинец					
	[3]	[6]	[8]	Расчет	[10]	Расчет	T, K	[3]	[5]	Расчет
20	—	905	—	881	—	11459	603	—	10670	10708
40	—	—	—	896	—	11518	623	10658	10650	10682
80	—	897	—	899	—	11518	653	—	10610	10641
100	—	894	—	897	11531	11507	673	—	10580	10611
150	—	886	—	891	—	11472	723	10536	10520	10533
200	—	877	—	881	11435	11432	753	—	10480	10488
250	—	868	—	866	—	11389	773	—	10460	10459
300	857	858	863	849	11340	11344	823	10418	10400	10396
350	825	—	—	831	—	11297	853	—	10360	10362
400	814	—	813	816	11245	11249	873	—	10340	10339
500	790	—	788	790	11128	11153	923	10302	10270	10284
600	767	—	765	768	11059	11046	953	—	10240	10250
700	—	—	740	746	—	10569	973	—	10210	10226
800	720	—	716	723	10430	10424	1023	10168	10150	10166
900	—	—	690	699	—	10310	1053	—	10110	10128
1000	672	—	665	674	10198	10194	1073	—	10090	10102

Таблица 5. Теплопроводности λ , Вт/(м·K) калия и свинца

T, K	Калий			Свинец				
	[1]	[4]	Расчет	[1]	[2]	[4]	[10]	Расчет
20	—	170	183.83	—	70	59	—	70.24
40	—	115	116.29	—	50	45	—	45.66
80	—	108	104.27	—	—	41	—	39.92
100	104.7	—	103.10	39.2	—	—	39.7	38.77
150	—	105	102.49	—	36.3	38	—	37.10
200	103.1	104	102.98	36.5	35	37	36.7	36.31
250	—	—	103.83	—	—	—	—	35.70
300	102.1	102	104.84	35	34.9	35	35.3	35.16
350	—	—	46.99	—	—	—	—	34.67
400	52.5	52	45.87	33.7	—	34	34	34.21
500	48.1	—	43.71	32.8	—	—	32.9	33.36
600	44.3	44	41.63	31.5	—	31	31.4	32.54
700	—	—	39.58	—	—	—	—	17.10
800	37.4	37	37.56	19	—	19	19	18.66
900	—	—	35.55	—	—	—	—	20.78
1000	31.8	31	33.55	21.4	—	22	21.4	21.83

$$\text{Теплопроводность: } f(T) = -27.3 + 14.5 \cdot z_1 - T \cdot [4.7 \cdot w_2 - 0.0175 \cdot z_3],$$

$$z_1 = \{1 - \text{th}(2000 \cdot [600.61 / T - 1])\} / 2, \quad w_2 = dz_2 / dT, \quad z_2 = \{1 - \text{th}(3.2 \cdot [1100 / T - 1])\} / 2,$$

$z_3 = \{1 - \text{th}(1.2 \cdot [600 / T - 1])\} / 2$. Из табл. 6 видно, что результаты вычислений согласуются с данными [14].

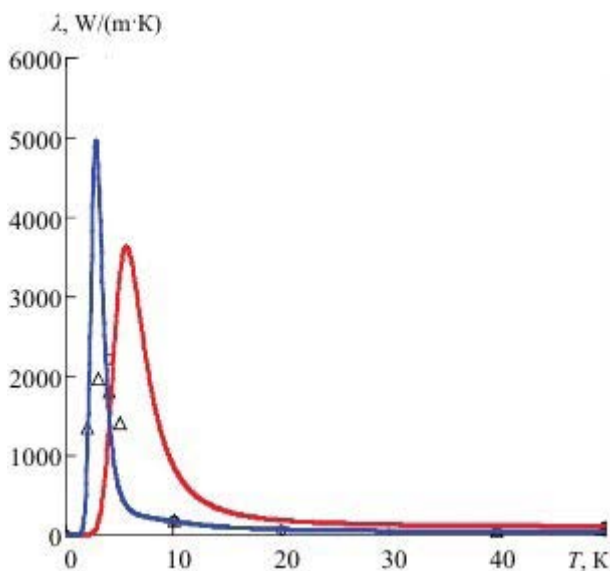


Рис. 2. Пики теплопроводностей калия (красная линия) и свинца (синяя линия): ● — данные [1], Δ — [4], ○ — [6].

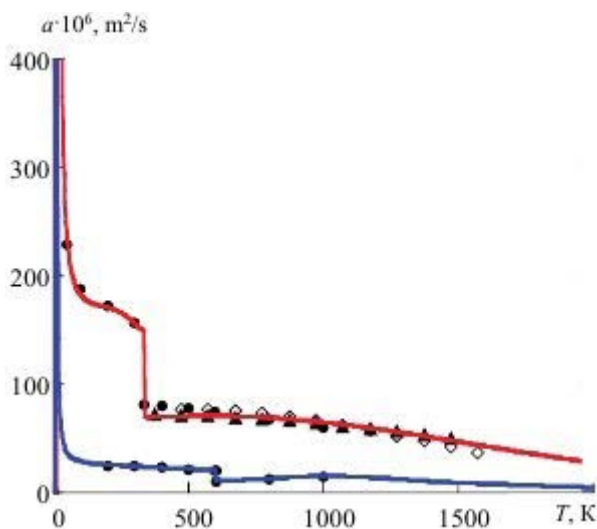


Рис. 3. Зависимости температуропроводностей калия (красная линия) и свинца (синяя линия) от температуры: ● — данные [1], ◊ — [5], ▲ — [10].

Температуропроводность: $f(T) = -23.2 + 9 \cdot z_1 - T \cdot [4.2 \cdot w_2 - 0.0165 \cdot z_3]$,
 $z_1 = \{1 - \text{th}(2000 \cdot [600.61 / T - 1])\} / 2$, $w_2 = dz_2 / dT$, $z_2 = \{1 - \text{th}(3 \cdot [1120 / T - 1])\} / 2$,
 $z_3 = \{1 - \text{th}(1.2 \cdot [700 / T - 1])\} / 2$. Из табл. 6 видно, что результаты вычислений адекватны данным [14].

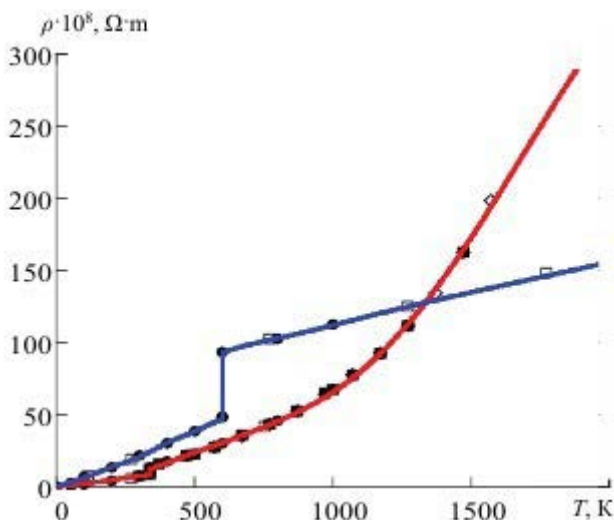


Рис. 4. Температурные графики удельных электросопротивлений калия (красная линия) и свинца (синяя линия): ● — данные [1], □ — [3], ◇ — [5], ■ — [43].

Таблица 6. Теплофизические свойства сплава $K_{9.3}Pb_{90.7}$ ($M_s = 203.86 \cdot 10^{-3}$ кг/моль)

T, K	C_p , Дж/(моль·K)		d , кг/м³		λ , Вт/(м·K)		$a \cdot 10^6$, м²/с		$\rho \cdot 10^8$, Ом·м
	[14]	Расчет	[14]	Расчет	[14]	Расчет	[14]	Расчет	Расчет
20	—	12.76	—	10330	—	53.50	—	181.78	1.13
40	—	23.07	—	10386	—	24.93	—	41.43	2.25
80	—	28.32	—	10386	—	18.60	—	23.05	4.53
100	—	29.26	—	10376	—	17.45	—	20.63	5.75
150	—	30.50	—	10344	—	15.89	—	17.86	9.27
200	—	31.36	—	10307	—	15.24	—	16.64	12.72
250	—	32.63	—	10267	—	14.88	—	15.54	15.90
300	—	34.94	10210	10226	—	14.78	—	14.07	19.51
350	—	36.72	10175	10179	—	9.45	—	5.27	24.24
400	—	36.22	10136	10135	—	9.61	—	5.12	28.93
500	—	35.52	10048	10048	—	10.33	—	5.57	36.98
600	34.86	34.89	9561	9950	11.02	11.32	6.73	6.74	45.97
700	34.05	34.33	9434	9521	12.36	12.40	7.85	7.85	92.88
800	33.23	33.55	9306	9389	13.50	13.50	8.91	8.65	97.53
900	32.41	32.56	9178	9285	14.46	14.47	9.89	9.93	102.30
1000	31.60	31.62	—	9179	15.23	15.29	10.81	10.79	107.63

Удельное электросопротивление: В последнем столбце табл. 6 приведена оценка удельного электросопротивления сплава $K_{9.3}Pb_{90.7}$ по формуле (11).

Проведенные вычисления показывают, что формирование теплофизических свойств компонентов и сплава $K_{9.3}Pb_{90.7}$ происходит в результате реализации стати-

ческих явлений (локальные значения характеристик) и протекания кинетических процессов в подсистемах (возникновение особенностей на температурных зависимостях). Наблюдаемые феномены определяются индивидуальными свойствами частиц и квазичастиц, а также коллективной реакцией образца на смену внешних условий. Если построить график температурной зависимости теплоемкости свинца по данным табл. 3, то при температурах $T_m = 600.61$ К (температура плавления свинца) и $T_q = 800$ К наблюдаются 2 пика. Первый пик отображает реализацию кинетического процесса в виде агрегатного размытого фазового перехода I рода типа кристалл-жидкость. Второй пик, по-видимому, связан с достижением коэффициентом теплового линейного расширения экстремального значения (см. рис. 1). При этом в области предплавления при температуре $T = 545.3$ К наблюдается скачок понижения плотности и теплопроводности свинца. Отметим, что после скачкообразного снижения теплопроводность свинца начинает увеличиваться с ростом температуры также, как и его теплопроводность.

Определенные особенности поведения температурных зависимостей теплофизических характеристик компонентов наследуются сплавом. Так при построении графика теплоемкости сплава возникает пик с вершиной в области температур, близких к температуре формирования вершины аналогичного пика при построении графика теплоемкости калия (фазовый переход I рода типа кристалл-жидкость). При температуре $T = 545.3$ К наблюдается скачок на температурной зависимости КТЛР сплава (см. рис. 4). Скачки на графиках теплопроводностей калия и свинца отражаются скачками не только на графиках их теплопроводностей, но и на графиках тепло- и теплопроводности сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$. Эффект наследования сплавом некоторых теплофизических характеристик компонентов подтвержден экспериментально [40–42]. Поэтому использование представленной методической схемы расчета тепловых свойств сплавов позволит уменьшить количество проводимых экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты расчета не только качественно, но и количественно верно описывают температурные зависимости теплофизических характеристик калия, свинца и их сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$. Они подтвердили применимость соотношений модели двухфазной локально-равновесной области и модифицированного правила смешения компонентов при имитации тепловых свойств компонентов и их сплава $K_{9,3}Pb_{90,7}$. Введение подгоночной функции в правило смешения связано с неидеальностью сплава, т.е. отклонением экспериментальных данных реального образца от температурных кривых теплофизических свойств модели идеальных фаз. В процессе вычислений подтверждено существование эффекта наследования сплавом определенных особенностей поведения тепловых величин компонентов. Спрогнозированные значения теплофизических характеристик на неисследованных температурных интервалах нуждаются в экспериментальной проверке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия. 1989.
2. Лариков Л.Н., Юрченко Ю.Ф. Структура и свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов. Киев: Наукова думка. 1985.
3. Дриц М.Е., Будберг П.Б., Бурханов Г.С., Дриц А.М., Пановко В.М. Свойства элементов. Справочник / Под ред. Дрица М.Е. М.: Металлургия. 1985.
4. Физические величины. Справочник / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат. 1991.
5. Кириллов П.Л., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства жидкометаллических теплоносителей (справочные таблицы и соотношения). Обзор, ФЭИ-0291. М.: ЦНИИАтоминформ. 2000.
6. Мельникова Т.П., Мозговой А.Г. Плотность, тепловое расширение и сжимаемость натрия и калия в твердой фазе // Теплофизика высоких температур. 1989. **27**. № 3. С. 490–498.
7. Кириллов П.Л., Богословская Г.П. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат. 2000.
8. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2011.
9. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение. 1975.
10. Муллоева Н.М. Физико-химические свойства сплавов свинца с щелочноземельными металлами / Дисс. ... канд. хим. наук. Душанбе: Институт химии им. В.И. Никитина. 2015.
11. Савченко И.В., Станкус С.В., Агажанов А.Ш. Измерение тепло- и температуропроводности жидкого свинца в интервале 601–1000 К // Атомная энергия. 2013. **115**. № 2. С. 74–77.
12. Банчила С.Н., Филиппов Л.П. Новые измерения комплекса тепловых свойств жидких олова и свинца // Теплофизика высоких температур. 1973. **11**, № 3. С. 668–671.
13. Савченко И.В. Экспериментальное исследование теплопроводности и температуропроводности расплавов легкоплавких металлов и сплавов методом лазерной вспышки / Автореф. ... к. ф.-м. н. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. 2013.
14. Агажанов А.Ш., Хайрулин А.Р., Абдуллаев Р.Н., Станкус С.В. Теплофизические свойства эвтектического сплава К-Pb в жидком состоянии // Теплофизика и аэромеханика. 2020. **27**, № 4. С. 655–658.
15. Абдуллаев Р.Н., Хайрулин Р.А., Станкус С.В. Плотность сплава калий-свинец эвтектического состава // Теплофизика и аэромеханика. 2013. **20**, № 1. С. 89–94.
16. Хайрулин Р.А., Станкус С.В., Абдуллаев Р.Н. Термические свойства сплавов системы К-Pb // Теплофизика и аэромеханика. 2015. **22**, № 3. С. 359–364.
17. Agazhanov A.Sh., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., Stankus S.V. Thermal Conductivity of Lithium, Sodium and Potassium in the Liquid State // Physics and Chemistry of Liquids. 2019. **74**. P. 1–9.
18. Agazhanov A.Sh., Khairulin A.R., Abdullaev R.N., Stankus S.V. Thermophysical Properties of Liquid K–Pb Alloys // Journal of Engineering Thermophysics. 2021. **30**, № 3. P. 365–373.
19. Агажанов А.Ш. Экспериментальное исследование теплопроводности и температуропроводности жидких теплоносителей и конструкционных материалов ядерной энергетики /

- Автореф. ... к. ф.-м. н. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. 2016.
20. Фокин Л.Р., Кулямина Е.Ю. Плотность жидкого калия на линии насыщения: краткая история длиной в 50 лет // Теплофизика высоких температур. 2021. **59**. № 1. С. 679–685.
 21. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Козлов Ф.А., Шимкевич А.Л. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики // Атомная энергия. 2002. **92**. № 1. С. 31–42.
 22. Гулевич А.В., Ефанов А.Д., Кириллов П.Л., Козлов Ф.А. Основные вопросы теплофизики ЯЭУ // Атомная энергия. 2004. **96**. № 5. С. 380–387.
 23. Кошман В.С. Об одном подходе к обобщению опытных данных по теплофизическим свойствам элементов Периодической системы Д.И. Менделеева // Пермский аграрный вестник. 2014. № 2 (6). С. 35–42.
 24. Займан Дж. Электроны и фононы. М.: Издательство иностранной литературы. 1962.
 25. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия. 1980.
 26. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Физматлит. 2010.
 27. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М.: Физматлит. 2005.
 28. Бабаева Ю.А. Полуэмпирические соотношения для расчета плотности, динамической вязкости и удельной теплоемкости жидкого калия // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2023. № 4. С. 134–139.
 29. Мажукин В.И., Королева О.Н., Шапранов А.В., Демин М.М., Алексашкина А.А. Определение теплофизических свойств золота в области фазового перехода плавление-кристаллизация. Молекулярно-динамический подход // Математическое моделирование. 2022. **34**. № 1. С. 59–80.
 30. Терехов С.В. Термодинамическая модель размытого фазового перехода в металлическом стекле $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ / Физика и техника высоких давлений. 2018. **28**. № 1. С. 54–61.
 31. Терехов С.В. Теплоемкость и тепловое расширение вещества / Справочник. Донецк: ДонФТИ им. А.А. Галкина. 2022.
 32. Терехов С.В. Расчет базисной линии теплоемкости вещества в модели двухфазной области при отсутствии фазовых и других переходов // Неорганические материалы. 2023. **59**. № 4. С. 468–472. [Terekhov S.V. Calculation of the heat capacity baseline in a model of a two-phase region in the absence of phase transformations and other transitions // Inorganic Materials. 2023. **59**. № 4. Р. 452–456.]
 33. Терехов С.В. Расчет теплоемкостей и коэффициентов линейного теплового расширения металлов легкой и тяжелой триад платины // Теплофизика высоких температур. 2023. **61**. № 5. С. 679–684.
 34. Терехов С.В. Расчет теплоемкостей сложных оксидов // Вестник НовГУ. 2024. №1(135). С. 31–42.
 35. Терехов С.В. Особенности на графиках тепловых характеристик металлов при отсутствии и наличии фазовых переходов // Физика твердого тела. 2024. **66**. № 7. С. 1144–1149.
 36. Stølen S., Grande T. Chemical thermodynamics of materials: macroscopic and microscopic aspects. Chichester West Sussex. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium. 2004.
 37. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. 1974.
 38. Ягодин Д.А. Исследование структурной неоднородности расплавов Ga–Bi и Pd–Si методами акустометрии и гамма-денситометрии / Автореф. ... к. ф.-м. н. Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет. 2007.

39. Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Малинин Л.А., Цалков В.Н. Теплофизические свойства компонентов горючих систем / Справочник под ред. Н.А. Силина. М.: НПО «Информация и технико-экономические исследования». 1992.
40. Попель П.С., Сидоров В.Е., Бродова И.Г., Кальво-Дальборг М., Дальборг У. Влияние термической обработки исходного расплава на структуру и свойства кристаллических слитков или отливок // Расплавы. 2020. № 1. С. 3–36.
41. Попель П.С., Сидоров В.Е., Кальво-Дальборг М., Дальборг У., Молоканов В.В. Влияние термической обработки жидкого сплава на его свойства в расплавленном состоянии и после аморфизации // Расплавы. 2020. № 3. С. 223–245.
42. Бельтюков А.Л., Русанов Б.А., Ягодин Д.А., Мороз А.И., Стерхов Е.В., Сон Л.Д., Ладынов В.И. Релаксация в аморфизирующемся расплаве Al–La // Расплавы. 2022. № 5. С. 485–493.
43. База данных по теплофизическим свойствам жидкометаллических теплоносителей перспективных ядерных реакторов. Теплофизические свойства жидкого калия и его пара // Государственная служба стандартных справочных данных в области использования атомной энергии. «РОСАТОМ» – НИЯУ МИФИ. Головной научно-методический центр данных (дата обращения 10.09.2024).

APPLICATION OF THE MODIFIED MIXING RULE COMPONENTS AND OF THEIR DATA FOR CALCULATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF LEAD-POTASSIUM ALLOYS

S. V. Terekhov*

Donetsk Institute of Physics and Technology A.A. Galkina, Donetsk, Russia

**e-mail: svlter@yandex.ru*

Alloys based on the potassium-lead system are used as liquid-metal coolants in heat-dissipating elements of fast neutron nuclear power plants. Due to the practical importance of this alloy, a semi-empirical calculation of thermophysical characteristics (heat capacity, coefficient of thermal linear expansion, density, thermal conductivity, thermal diffusivity and specific electrical resistance) of potassium, lead and melt of lead with potassium was carried out. For calculations we used the arrays of experimental data coordinated with each other, relations of the author's model of two-phase local-equilibrium region and the modified rule of mixing of components. In the formation of thermal properties of components and their alloys give as phenomena in any small neighborhood of the sample point (local level), and collective phenomena of reactions of all points of the alloy (substantive level) to temperature changes. The existence of features in the temperature dependences of potassium and lead in the form of peaks, pits and jumps, as well as the inheritance of some graphical features of the temperature curves of components in the formation of thermal properties of the melt are indicated. By means of approximation of the experimental data of the melt, the disappearance of some features during the formation of the alloy was established. On experimentally unexplored temperature intervals the behavior of thermophysical characteristics of components is demonstrated, and thermal properties of the melt are displayed in the form of tables. It is pointed out the necessity of additional experimental work to verify the calculations performed and to clarify the behavior of thermophysical characteristics of the components and their alloy at unexplored temperature intervals.

Keywords: potassium, lead, alloy, heat capacity, coefficient of thermal linear expansion, density, thermal conductivity, thermal diffusivity

REFERENCES

1. Zinov'ev V.E. Teplofizicheskie svojstva metallov pri vy'sokix temperaturax [Thermophysical properties of metals at high temperatures]. Moscow: Metallurgiya. 1989. [In Russian].
2. Larikov L.N., Yurchenko Yu.F. Struktura i svojstva metallov i splavov. Teplovy'e svojstva metallov i splavov [Structure and properties of metals and alloys. Thermal properties of metals and alloys]. Kiev: Naukova dumka. 1985. [In Russian].
3. Dricz M.E., Budberg P.B., Burxanov G.S., Dricz A.M., Panovko V.M. Svojstva e'lementov [Element properties]. Spravochnik / Pod red. Dricza M.E. Moscow: Metallurgiya. 1985. [In Russian].
4. Fizicheskie velichiny' [Physical quantities]. Spravochnik / Pod. red. I.S. Grigor'eva, E.3. Mejlixova. Moscow: E'nergoatomizdat. 1991. [In Russian].
5. Kirillov P.L., Deniskina N.B. Teplofizicheskie svojstva zhidkometallicheskih teplonositelej (spravochny'e tablicy i sootnosheniya) [Thermophysical properties of liquid-metal heat-carriers (reference tables and relations)]. Obzor, FE'I-0291. Moscow: CzNIIatominform. 2000. [In Russian].
6. Mel'nikova T.P., Mozgovoy A.G. Plotnost', teplovoe rasshirenie i szhimaemost' natriya i kaliya v tverdoj faze [Density, thermal expansion and compressibility of sodium and potassium in the solid phase] // Teplofizika vy'sokix temperatur. 1989. **27**. № 3. P. 490–498. [In Russian].
7. Kirillov P.L., Bogoslovskaya G.P. Teploobmen v yaderny'x e'nergeticheskix ustanovkax [Heat exchange in nuclear power plants]. Moscow: E'nergoatomizdat. 2000. [In Russian].
8. Korotkix A.G. Teploprovodnost' materialov: uchebnoe posobie [Thermal conductivity of materials: textbook]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politexnicheskogo universiteta. 2011. [In Russian].
9. Noviczkiy L.A., Kozhevnikov I.G. Teplofizicheskie svojstva materialov pri nizkix temperaturax [Thermophysical properties of materials at low temperatures]. Spravochnik. Moscow.: Mashinostroenie. 1975. [In Russian].
10. Mulloeva N.M. Fiziko-ximicheskie svojstva splavov svincza s shhelochnozemel'ny'mi metallami [Physico-chemical properties of lead alloys with alkaline-earth metals] / Diss. ... kand. xim. nauk. Dushanbe: Institut ximii im. V.I. Nikitina. 2015. [In Russian].
11. Savchenko I.V., Stankus S.V., Agazhanov A.Sh. Izmerenie teplo- i temperaturoprovodnosti zhidkogo svincza v intervale 601–1000 K [Measurement of heat and thermal conductivity of liquid lead in the interval 601–1000 K] // Atomnaya e'nergiya. 2013. **115**. № 2. P. 74–77. [In Russian].
12. Banchila S.N., Filippov L.P. Novy'e izmereniya kompleksa teplovy'x svojstv zhidkix olova i svincza [New measurements of the complex of thermal properties of liquid tin and lead] // Teplofizika vy'sokix temperatur. 1973. **11**. № 3. P. 668–671. [In Russian].
13. Savchenko I.V. E'ksperimental'noe issledovanie teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti rasplavov legkoplavkix metallov i splavov metodom lazernoj vspy'shki [Experimental study of thermal conductivity and diffusivity of melts of fusible metals and alloys by laser flash method] / Avtoref. ... k. f.-m. n. Novosibirsk: Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze Sibirskogo otdeleniya RAN. 2013. [In Russian].
14. Agazhanov A.Sh., Xajrulin A.R., Abdullaev R.N., Stankus S.V. Teplofizicheskie svojstva e'vtekticheskogo splava K-Pb v zhidkom sostoyanii [Thermophysical properties of eutectic K-Pb alloy in the liquid state] // Teplofizika i ae'romexanika. 2020. **27**. № 4. P. 655–658. [In Russian].
15. Abdullaev R.N., Xajrulin R.A., Stankus S.V. Plotnost' splava kalij-svinecz e'vtekticheskogo sostava [Density of potassium-lead alloy of eutectic composition] // Teplofizika i ae'romexanika. 2013. **20**. № 1. P. 89–94. [In Russian].
16. Xajrulin R.A., Stankus S.V., Abdullaev R.N. Termicheskie svojstva splavov sistemy' K-Pb [Thermal properties of alloys of K-Pb system] // Teplofizika i ae'romexanika. 2015. **22**. № 3. P. 359–364. [In Russian].

17. Agazhanov A.Sh., Abdullaev R.N., Samoshkin D.A., Stankus S.V. Thermal Conductivity of Lithium, Sodium and Potassium in the Liquid State // *Physics and Chemistry of Liquids*. 2019. **74**. P. 1–9.
18. Agazhanov A.Sh., Khairulin A.R., Abdullaev R.N., Stankus S.V. Thermophysical Properties of Liquid K–Pb Alloys // *Journal of Engineering Thermophysics*. 2021. **30**. № 3. P. 365–373.
19. Agazhanov A.Sh. E'ksperimental'noe issledovanie teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti zhidkix teplonositelej i konstrukcionny'x materialov yadernoj e'nergetiki [Experimental study of thermal conductivity and thermal diffusivity of liquid coolants and structural materials of nuclear power engineering] / Avtoref. ... k. f.-m. n. Novosibirsk: Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze Sibirskogo otdeleniya RAN. 2016. [In Russian].
20. Fokin L.R., Kulyamina E.Yu. Plotnost' zhidkogo kaliya na linii nasy'shheniya: kratkaya istoriya dlinoyu v 50 let [Density of liquid potassium at the saturation line: a brief history of 50 years] // *Teplofizika vy'sokix temperatur*. 2021. **59**. № 1. P. 679–685. [In Russian].
21. Subbotin V.I., Arnol'dov M.N., Kozlov F.A., Shimkevich A.L. Zhidkometallicheskie teplonositeli dlya yadernoj e'nergetiki [Liquid-metallic coolants for nuclear power engineering] // *Atomnaya e'nergiya*. 2002. **92**. № 1. P. 31–42. [In Russian].
22. Gulevich A.V., Efanov A.D., Kirillov P.L., Kozlov F.A. Osnovny'e voprosy' teplofiziki YaE-'U [Basic questions of NPP thermal physics] // *Atomnaya e'nergiya*. 2004. **96**. № 5. P. 380–387. [In Russian].
23. Koshman V.S. Ob odnom podxode k obobshcheniyu opy'tny'x danny'x po teplofizicheskim svojstvam e'lementov Periodicheskoy sistemy' D.I. Mendeleeva [About one approach to generalization of experimental data on thermal properties of elements of the Periodic System of D.I. Mendeleev] // *Permskij agrarny'j vestnik*. 2014. № 2 (6). P. 35–42. [In Russian].
24. Zajman Dzh. E'lektrony' i fonony'. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoj literatury', 1962. [Ziman J.M. Electrons and Phonons. Oxford at the Clarendon Press, 1960].
25. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Lipeckij Ya.L. Fizicheskie svojstva metallov i splavov [Physical properties of metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya. 1980. [In Russian].
26. Abrikosov A.A. Osnovy' teorii metallov [Fundamentals of metal theory]. Moscow: Fizmatlit. 2010. [In Russian].
27. Brandt N.B., Kul'bachinskij V.A. Kvazichasticy v fizike kondensirovannogo sostoyaniya [Quasiparticles in condensed state physics]. Moscow: Fizmatlit. 2005. [In Russian].
28. Babaeva Yu.A. Polue'mpiricheskie sootnosheniya dlya rascheta plotnosti, dinamicheskoy vyazkosti i udel'noj teploemkosti zhidkogo kaliya [Semiempirical relations for calculation of density, dynamic viscosity and specific heat capacity of liquid potassium] // *Izvestiya vuzov. Yadernaya e'nergetika*. 2023. № 4. P. 134–139.
29. Mazhukin V.I., Koroleva O.N., Shapranov A.V., Demin M.M., Aleksashkina A.A. Opredelenie teplofizicheskix svojstv zolota v oblasti fazovogo perexoda plavlenie-kristallizatsiya. Molekulyar-no-dinamicheskij podhod [Determination of thermophysical properties of gold in the melting-crystallization phase transition region. Molecular dynamic approach] // *Matematicheskoe mode-lirovanie*. 2022. **34**. № 1. P. 59–80.
30. Terexov S.V. Termodinamicheskaya model' razmy'togo fazovogo perexoda v metallicheskom stekle $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ [Thermodynamic model of the blurred phase transition in metallic glass $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$] // *Fizika i tekhnika vy'sokix davlenij*. 2018. **28**. № 1. P. 54–61. [In Russian].
31. Terekhov S.V. Teplovy'e svojstva veshchestva [Thermal properties of matter] // *Fizika i tekhnika vysokix davlenij*. 2022. **32**. № 3. P. 21–34. [In Russian].
32. Terexov S.V. Raschet bazisnoj linii teploemkosti veshchestva v modeli dvufaznoj oblasti pri otsutstvii fazovy'x i drugix perexodov // *Neorganicheskie materialy*. 2023. **59**. № 4. P. 468–472. [Terekhov S.V. Calculation of the heat capacity baseline in a model of a two-phase region in the

- absence of phase transformations and other transitions // *Inorganic Materials*. 2023. **59**. № 4. P. 452–456. [In Russian].
33. Terexov S.V. Raschet teploemkостей i koefficientov linejnogo teplovogo rasshireniya metallov legkoj i tyazhelej triad platiny' // *Teplofizika vy'sokix temperatur*. 2023. **61**. № 5. P. 679–684. DOI: 10.31857/S0040364423050186. [Terekhov S.V. Calculation of heat capacity and coefficients of linear thermal expansion of light and heavy platinum triad metals // *High temperature*. 2023. **61**, № 5. P. 617–622. DOI: 10.1134/S0018151X23050188]. [In Russian].
34. Terexov S.V. Raschet teploemkостей slozhny'x oksidov [Calculation of heat capacities of complex oxides] // *Vestnik NovGU*. 2024. № 1(135). P. 31–42. [In Russian].
35. Terexov S.V. Osobennosti na grafikax teplovy'x xarakteristik metallov pri otsutstvii i nalichii fazovy'x perexodov [Features on the graphs of thermal characteristics of metals in the absence and presence of phase transitions] // *Fizika tverdogo tela*. 2024. **66**. № 7. P. 1144–1149. [In Russian].
36. Stølen S., Grande T. Chemical thermodynamics of materials: macroscopic and microscopic aspects. Chichester West Sussex. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium. 2004.
37. Novikova S.I. Teplovoe rasshirenie tverdy'x tel [Thermal expansion of solids]. Moscow: Nauka. 1974. [In Russian].
38. Yagodin D.A. Issledovanie strukturnoj neodnorodnosti rasplavov Ga-Bi i Pd-Si metodami akustometrii i gamma-densimetrii [Investigation of structural heterogeneity of Ga-Bi and Pd-Si melts by methods of acoustometry and gamma-densitometry] / Avtoref. ... k. f.-m. n. Ekaterinburg: Ural'skij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet. 2007. [In Russian].
39. Sheludyak Yu.E., Kashporov L.Ya., Malinin L.A., Czalkov V.N. Teplofizicheskie svojstva komponentov goryuchix sistem [Thermophysical properties of components of combustible systems]. Spravochnik pod red. N.A. Silina. M.: NPO «Informaciya i tekhniko-e'konomicheskie issledovaniya». 1992. [In Russian].
40. Popel' P.S., Sidorov V.E., Brodova I.G., Kal'vo-Dal'borg M., Dal'borg U. Vliyanie termicheskoy obrabotki isxodnogo rasplava na strukturu i svojstva kristallicheskich slitkov ili otlivok [Effect of heat treatment of the initial melt on the structure and properties of crystalline ingots or castings] // *Rasplavy (Melts)*. 2020. № 1. P. 3–36. [In Russian].
41. Popel' P.S., Sidorov V.E., Kal'vo-Dal'borg M., Dal'borg U., Molokanov V.V. Vliyanie termicheskoy obrabotki zhidkogo splava na ego svojstva v rasplavlennom sostoyanii i posle amorfizacii [Effect of heat treatment of a liquid alloy on its properties in the molten state and after amorphization] // *Rasplavy (Melts)*. 2020. № 3. P. 223–245. [In Russian].
42. Bel'tyukov A.L., Rusanov B.A., Yagodin D.A., Moroz A.I., Sterxov E.V., Son L.D., Lad'-yanov V.I. Relaksaciya v amorfiziruyushhemsya rasplave Al–La [Relaxation in the amorphizing melt Al–La] // *Rasplavy (Melts)*. 2022. № 5. P. 485–493. [In Russian].
43. Baza danny'x po teplofizicheskim svojstvam zhidkometallicheskich teplonositelej perspektivny'x yaderny'x reaktorov. Teplofizicheskie svojstva zhidkogo kaliya i ego para [Database on thermophysical properties of liquid-metal coolants of advanced nuclear reactors. Thermophysical properties of liquid potassium and its vapor] // Gosudarstvennaya sluzhba standartny'x spravochny'x danny'x v oblasti ispol'zovaniya atomnoj e'nergii. «ROSATOM» – NIYaU MIFI. Golovnoj nauchno-metodicheskij centr danny'x (data obrashheniya 10.09.2024).