

Поверхностное натяжение и адсорбция компонентов в сплавах системы натрий-калий, перспективных как эффективные жидкометаллические теплоносители в ядернокосмической энергетике

**Б. Б. Алчагиров, Л. Х. Афаунова, Ф. Ф. Дышекова, З. А. Кегадуева,
А. Г. Мозговой, Р. Х. Архестов, Т. М. Таова, Х. Б. Хоконов**

Дан краткий обзор состояния исследований поверхностного натяжения (ПН) сплавов бинарной системы натрий – калий. Исследовано ПН сплавов системы Na – K, приготовленных в идентичных условиях. Измерение ПН проводили в полном концентрационном интервале составов сплавов, образованных при одной заправке прибора исходными компонентами Na и K высокой чистоты. Показано, что на изотерме ПН изученной системы отсутствует ранее отмечавшийся в литературе минимум. Компонент калий адсорбируется положительно на поверхности сплавов и проходит через максимум вблизи сплавов с содержанием около 13 ат.% K.

Ключевые слова: сплавы системы натрий – калий, сплав, поверхностное натяжение, активность, адсорбция, теплоноситель.

A brief review of experimental studies on surface tension (ST) of binary alloys of Na-K system is given. The paper also presents the authors' experimental results on ST of Na-K alloys over the whole concentration range, obtained by the all-soldered measuring device, which allows to prepare alloys without opening the last. It should be noted, that no minimum in the ST-isotherms of Na – K alloys has been found, revealed by other authors. Calculation showed that the adsorption of K takes place over the whole composition range and reaches its maximum near 13 at.% of K.

Keywords: sodium – potassium alloys, surface tension, activity, adsorption, coolant.

Введение

Жидкие щелочные металлы и сплавы на их основе являются перспективными материалами для атомной и термоядерной энергетики и других отраслей новой техники и технологии [1, 2]. В частности, жидкий натрий и эвтектический сплав системы Na – K используются как теплоносители в ядерных энергетических установках, тепловых трубах и т.д. [3, 4]. Сплавы натрия, содержащие 40 – 90% калия, находятся в жидком состоянии при комнатной температуре. Они незаменимы в качестве теплоносителей для реакторов на быстрых нейтронах, так как наряду с благоприятными ядерно-физическими свойствами обладают теплопроводностью, превос-

ходящей теплопроводность обычных жидкостей на несколько порядков.

Актуальность проблемы заключается в необходимости резкого увеличения ресурса работы космических энергоустановок и их мощностей при малом весе и низкой вязкости теплоносителя, что требует дальнейших исследований теплофизических и физико-химических свойств щелочных металлов и их сплавов. Между тем известно, что ПН жидких растворов бинарных систем щелочных металлов экспериментально изучено недостаточно полно, а для некоторых из них имеются лишь единичные данные [5 – 8]. По настоящее время остаются неизученными бинарные системы щелочных металлов на основе лития с частичной или полной несмешиваемостью в

жидком состоянии, представляющие несомненный интерес для теплофизики и теории растворов. В ряде случаев литературные данные об изотермах концентрационной зависимости ПН $\sigma(x)$ бинарных систем щелочных металлов носят противоречивый характер, в том числе и для системы Na – K [5 – 9]. Более того, большинство измерений ПН проведено в небольших температурных и (или) концентрационных интервалах без обеспечения достаточно надежного термодинамического равновесия поверхностей исследуемых расплавов со своим насыщенным паром, и т.д.

Цель настоящей работы — проанализировать имеющиеся результаты экспериментальных исследований температурных и концентрационных зависимостей ПН расплавов системы Na – K и представить новые данные о политерме и изотерме ПН $\sigma(x, T)$ этой системы, полученные нами в условиях высокого статического вакуума на образцах металлов-компонентов повышенной чистоты. При этом особое внимание обращали на обеспечение полной идентичности условий приготовления всех сплавов и измерений ПН во всем концентрационном интервале составов, что в принципе возможно только при прохождении полного интервала составов системы Na – K одной-единственной заправкой цельнопаянного прибора.

Состояние экспериментальных исследований ПН сплавов системы натрия – калий

К настоящему времени проведено лишь с десяток экспериментальных исследований температурных и концентрационных зависимостей поверхностного натяжения $\sigma(x, T)$ сплавов системы Na – K, а полученные результаты не обладают необходимой точностью и надежностью и, более того, носят противоречивый характер. Так, изотерма ПН $\sigma(x, T)$, полученная в [10] при 466 К методом капиллярного поднятия, проходит через максимум при содержании в натрии 40 масс.% калия. Воспроизводимость результатов эксперимента при этом составила лишь $\pm 10\%$. В работе [11] ПН измерено методом лежащей капли только для одного сплава, содержащего 40 масс.% калия, и лишь при нескольких температурах (относительная погрешность эксперимента — около 10%). П. Пугачевич и Р. Лебедев измерили плотность и ПН пяти сплавов системы Na – K в температурном интервале от 293 до 423 К с помощью двухкапиллярного вакуумного пикнометра и усовершенствованного ими же гравитационного прибора с одной калиброванной трубкой [9]. Построенная в [9] изотерма ПН $\sigma(x)$ (рис. 1) в сопоставлении с диаграм-

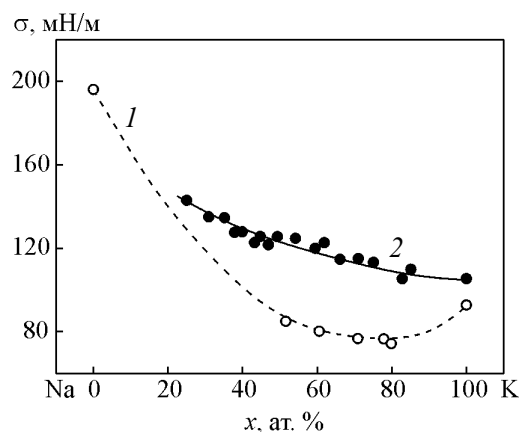


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения $\sigma(x)$ сплавов системы натрия – калий (при $T = 375\text{K}$): 1 – данные Р. Лебедева и П. Пугачевича [9, 12, 13], 2 – данные [14].

мой состояния системы Na – K показывает, что эвтектической точке на диаграмме фазовых состояний отвечает широкий минимум на изотерме ПН $\sigma(x)$, “глубина” которого ($\sim 16\text{ мН/м}$) в несколько раз превышает погрешность эксперимента.

Общие недостатки ранних работ [10, 11] — несовершенство применявшихся в то время методов и техники эксперимента, использование в опытах образцов-металлов с заметным содержанием примесей. Между тем известно, что самые незначительные загрязнения или примеси поверхностно-активных веществ могут привести к появлению экстремумов на политермах $\sigma(T)$ и изотермах ПН $\sigma(x)$ жидкометаллических расплавов [15, 16]. Более того, величина (a в отдельных случаях и знак) температурного коэффициента ПН $d\sigma/dT$, а также характер концентрационной и температурной зависимостей $\sigma(x, T)$ металлов и сплавов могут существенно изменяться при использовании в экспериментах в качестве защитной атмосферы инертных газов с минимальными примесями кислорода и других веществ. Источниками последних может быть наличие вакуумных смазок в кранах и шлифах, используемых в ряде работ экспериментальных установках для измерения ПН и т.д. Например, при измерении ПН методом максимального давления в газовом пузырьке аргона с микропримесью кислорода, использованного в качестве рабочего тела в [17, 18], привело к уменьшению ПН натрия от 194 до 186 мДж/м² (растворимость кислорода в жидких щелочных металлах достигает значительных величин, в частности, для Na она составляет около 1%) [19, 20].

Наиболее полно, с использованием металлов высокой чистоты в условиях высокого статического вакуума с соблюдением термодинамического

равновесия исследуемой поверхности со своим насыщенным паром, было изучено ПН 17 сплавов системы Na – K в интервале составов от чистого калия до 76 ат.% Na в K в работе [14]. Оказалось, что на изотерме ПН в изученном интервале составов, в отличие от данных [9], не обнаружено каких-либо особенностей в виде экстремумов вблизи сплавов эвтектического состава.

Однако, в работе [14] осталась не изученной наиболее интересная область сплавов системы Na – K с содержанием калия до 24 ат.%, в которой, согласно теориям поверхностной сегрегации и критериям поверхностной активности, следует ожидать значительную поверхностную активность калия в растворах на основе натрия.

Методика эксперимента

Как показано выше, измерения ПН, выполненные до последнего времени, проведены в различных условиях, поэтому относятся к различным состояниям поверхности. Известно, что ПН в значительной степени зависит от состояния поверхности исследуемых металлов и сплавов. Поэтому определение ПН в одних и тех же условиях, особенно для высокоактивных щелочных металлов и их сплавов, приобретает принципиальное значение. Отличительная особенность использованного нами прибора [21] в сравнении с существующими устройствами подобного назначения заключается в том, что он позволяет при одной заправке исходными компонентами, без его вскрытия и разгерметизации с целью приготовления новых сплавов, в высоком статическом вакууме составлять сплавы желаемого количества и состава во всем концентрационном интервале и определять ПН. Это и обеспечивает строгую идентичность условий приготовления всех образцов-сплавов и измерений ПН. Общая погрешность, накапливаемая в определении концентрации сплавов к концу измерений, при этом не превышает 0,2%.

В экспериментах для приготовления сплавов использовали металлы-компоненты высокой чистоты (табл. 1). ПН измеряли методом большой капли

[22] в области от ликвидусных температур до 450 К. Общая погрешность измерений ПН составила 1 – 1,5%.

Юстировку подложек вдоль горизонтальной плоскости перед измерениями ПН осуществляли катетометром В-630 [23]. Фотографирование капли производили фотокамерой с объективом Индустар-37, обеспечивающей негативное изображение контура капли с оптимальным 5-кратным увеличением. Обмер негативных фотоизображений капель всех сплавов производили на измерительном микроскопе УИМ-21.

Измерения ПН осуществляли в воздушном термостате, в который устанавливали измерительную ячейку (прибор), жестко закрепленную на вращающейся рамке. Термостат также мог вращаться вокруг горизонтальной оси на любой угол, поэтому прибор (измерительную ячейку) можно было ориентировать и фиксировать в пространстве в любом положении. Устройство для интенсивного перемешивания воздуха внутри термостата позволяло поддерживать необходимое безградиентное температурное поле, отклонение которого от среднего значения температуры не превышало $\pm 0,3$ К.

На рис. 2 схематически показан использованный в работе цельнопапаянный прибор, позволяющий

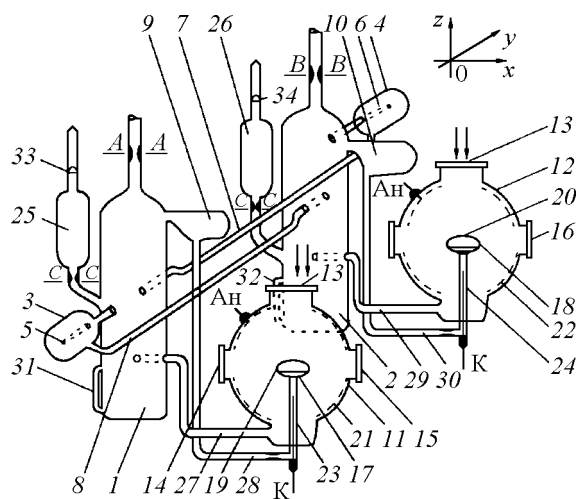


Рис. 2. Прибор для изучения ПН и работы выхода электрона (РВЭ) многокомпонентных растворов: 1, 2 – резервуары для компонентов А и В; 3, 4 – затворы; 5, 6 – капельницы; 7, 8 – калиброванные капилляры; 9, 10 – мерные объемы; 11, 12 – измерительные камеры; 13 – кварцевые окна; 14 – оптические окна для фотографирования капель; 17, 18 – подложки для формирования капель; 19, 20 – капли расплавов; 21 – 24 – аноды Ан и катоды К; 25, 26 – ампулы с отработанными металлами; 27 – 30 – коммуникационные трубки; 31, 32 – откалиброванные капилляры для оценки углов смачивания (из той же трубки, что и капилляры 7, 8); 33, 34 – тонкостенные сферические перегородки.

Таблица 1

Содержание примесей в натрии и калии, использованных для измерения температурных и концентрационных зависимостей поверхностного натяжения их сплавов

Металл	Т У	Примеси, масс.%	
		Na	K
Натрий	48-4-475-86	99,993	0,007
Калий	48-4-476-86	0,008	99,992

определять ПН бинарных жидкометаллических систем в полном концентрационном интервале составов при одной-единственной заправке его чистыми исходными компонентами [21]. Известные количества компонентов M_A и M_B из заправочных бункеров, напаянных сверху (не показаны на рис. 2) на цельнопаянный прибор, после соответствующей термовакуумной обработки переводили в резервуары 1 и 2, соответственно. Бункеры затем отпаивались по линиям $A - A$ и $B - B$, а прибор с металлами на специальной рамке устанавливали внутри воздушного термостата, позволяющего жестко фиксировать прибор в любом положении в пространстве.

Для измерения ПН чистых компонентов поворотом прибора по часовой стрелке в плоскости чертежа XOZ на угол $\sim 90^\circ$ вокруг оси OY (направленной за плоскость листа), из резервуаров 1 и 2 в мерные объемы 9 и 10 переводили часть металлов A и B . При возвращении прибора в исходное положение металлы поступают по коммуникационным трубкам 28 и 30 соответственно в чашки-подложки 17 и 18, заполняя их и образуя капли 19 и 20. Фотографируя капли через окна 14, 15 и 16, известным способом “большой капли” определяют ПН. При необходимости, облучая вершину капли сверху через кварцевые окна 13 монохроматическим светом различных длин волн, измеряют соответствующие фототочки, по которым определяют работу выхода электрона (РВЭ) [24].

После окончания измерений ПН и РВЭ, поворотом прибора в плоскости чертежа на угол $\sim 90^\circ$ против часовой стрелки, жидкие металлы A и B по коммуникационным трубкам 27 – 30 переливаются из измерительных камер обратно в резервуары 1 и 2. В случае необходимости повторных измерений с чистыми металлами процедуру можно повторять требуемое число раз. Для приготовления сплавов на основе компонента A поворотом прибора вокруг оси Ox за плоскость чертежа на угол $\sim 90^\circ$ через капельницу 6 в затвор 4 вводится несколько капель компонента B (число капель пропорционально шагу по концентрации). При возвращении прибора в исходное положение отлитая часть металла B автоматически поступает в калиброванный капилляр 7 в виде столба жидкости определенной длины. Внутренние диаметры D_1 и D_2 капилляров 7 и 8 до сборки прибора измерены на измерительном микроскопе с большой точностью. Измерив длину L столба отлитой жидкости B и определив ее объем $V_B = \pi D_1^2 L / 4$, поворотом прибора вокруг оси Ox “к себе” на угол $\sim 45^\circ$, добавляем его к металлу A в резервуаре 1. Таким образом приготавливается первый сплав на основе компонента A . Поскольку плотности компонентов ρ_A

и ρ_B и их сплавов $\rho(x)$ считаются известными, то массу добавляемой порции металла (или сплава) определяли по формуле $M_B = \rho_B V_B$, что позволяло легко рассчитать состав образованного сплава.

После перемешивания и выдержки сплава с целью его гомогенизации можно измерять ПН приготовленного сплава на основе A и (или) чистого компонента B , как это описано выше для чистых компонентов. Для измерения ПН сплавов бинарной системы в полном концентрационном интервале составов, то есть с обоих концов диаграммы состояния (в этом случае достигается максимальная эффективность использования прибора), готовят второй сплав на основе компонента B . Для этого соответствующими поворотами прибора из резервуара 1 через капельницу 5 в затвор 3 отливают часть раствора, состав которого предварительно определен (считается известной его плотность). Далее по калиброванной трубке 8 раствор переводят в резервуар 2, по ходу действия определяя объем и массу добавляемой порции раствора на основе A . После гомогенизации полученных сплавов определяли их ПН и РВЭ аналогично тому, как это описано выше для чистых компонентов. В случае необходимости измерения для данных сплавов повторяют желаемое число раз.

Описанные операции приготовления сплавов новых составов и соответствующие измерения ПН продолжают до тех пор, пока различие в составах последних двух полученных растворов (со стороны компонента A и компонента B) не окажется равным принятому по плану эксперимента, или же пока составы сплавов не сравняются. В общем случае конечный состав растворов в резервуарах 1 и 2 определяется как исходными количествами заправленных в них компонентов A и B и их плотностями, так и последовательностью и количеством промежуточных сплавов.

После полного окончания измерений сплавы из резервуаров 1 и 2 поворотом прибора вокруг оси OY против часовой стрелки на угол около 180° переводятся соответственно в разгрузочные ампулы 25 и 26, которые затем отпаиваются по линиям $C - C$.

Результаты и их обсуждение

Полученные результаты измерения температурных и концентрационных зависимостей ПН представлены на рис. 3. В интервале температур 350 – 450 К температурные зависимости ПН растворов Na – K описываются линейными уравнениями с отрицательными температурными коэффициентами (ТКПН). По мере увеличения содержания K в сплавах

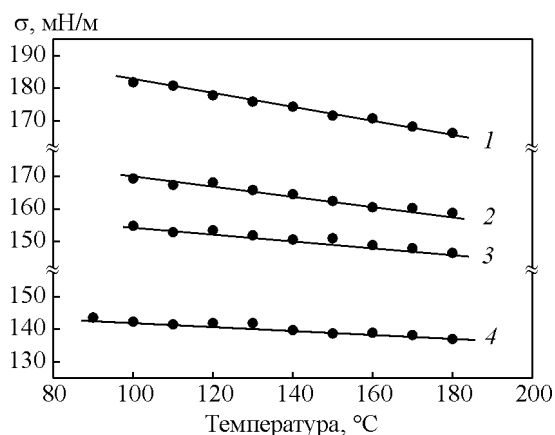


Рис. 3. Температурные зависимости поверхностного натяжения некоторых сплавов Na – K: 1 – 2,8 ат.% K, 2 – 6,2 ат.% K, 3 – 12,0 ат.% K, 4 – 17,1 ат.% K в Na.

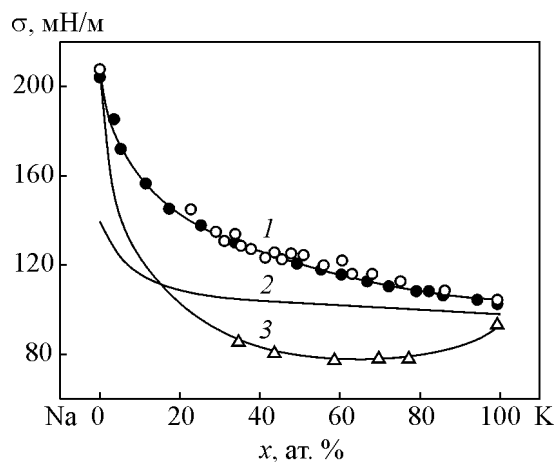


Рис. 4. Изотермы поверхностного натяжения сплавов системы натрий – калий: 1 – эксперимент: ● – настоящая работа; ○ – по данным [14] (Б. Алчагиров и сотр.), $T = 375$ K; 2 – теоретические расчеты (А. Шебзухов и сотр.) [5, 27], $T = 375$ K; 3 – экспериментальные данные (П. Пугачевич и сотр.) [9, 12, 13], $T = 375$ K.

с Na ТКПН по абсолютной величине уменьшаются. По нашему мнению, температурная зависимость ПН жидких сплавов Na с K определяется в основном двумя одновременно протекающими процессами: понижением ПН по мере повышения температуры (то есть с ростом поверхностной энтропии) и адсорбционно-десорбционными процессами на поверхности сплавов [25].

Изотерма ПН сплавов системы натрий – калий при температуре 375 K показана на рис. 4 (кривая 1, черные точки) в сравнении с данными работы [14] (светлые точки). Они свидетельствуют об удовлетворительном согласии результатов обеих работ: в них не нашло подтверждения данных о наличии минимума на изотерме ПН системы Na – K вблизи сплавов эвтектических составов, отмеченного ранее П. Пугачевичем и сотр. [9, 12, 13] (рис. 4, кривая 3).

ПН и РВЭ — важнейшие энергетические характеристики поверхности и тесно связаны между собой [26]. На изотерме РВЭ системы Na – K также нет особенностей в области эвтектического состава [24].

Теоретические расчеты изотермы ПН и адсорбции калия в системе Na – K на основе электронно-статистической теории (табл. 2) также не подтверждают наличие минимума на $\sigma(x)$ (рис. 4, кривая 2) [5, 27]. Заметим, что авторы [27] располагали лишь единственными в то время экспериментальными данными П. Пугачевича [9, 13] и, как видно из табл. 2, старались найти согласие с экспериментом (расчеты ПН вели вплоть до сотых долей мН/м, что намного превышает как погрешности расчетов, так и измерений ПН).

Результаты [27] лишь качественно отражают экспериментальные данные (рис. 4, кривые 1 и 2). Как было показано впоследствии, данные [9, 12, 13] из-за значительного количества примесей в образцах натрия и калия (около 2% остальных щелочных металлов) действительно оказались ошибочными [14].

Как и следовало ожидать, например, из термодинамических критериев оценки поверхности активности компонентов [28, 29], наши данные свидетельствуют о достаточно высокой поверхностной активности калия в области его малого содержания в сплаве: добавка 10 ат.% калия к натрию понижает ПН на 20 % и более (рис. 4). Значение предельной поверхностной активности калия, по нашим расчетам, составило около 1000 мН/(м·ат.доли). Об этом же свидетельствуют и результаты расчетов адсорбции K в сплавах с Na в “N”-варианте Гуггенгейма – Адама [30] (рис. 5). Из них следует, что максимальное значение адсорбции K на поверхности расплавов достигается в области составов сплавов с 13 ат.% K в Na [31].

Следует подчеркнуть, что изотерма адсорбции калия $\Gamma_K^{(N)}$ в сплавах с натрием, рассчитанная П. Пугачевичем и сотр. [13] на основе собственных

Таблица 2

Результаты расчетов ПН сплавов системы Na – K при $T = 400$ K [5, 27]

Калий, ат. %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
σ , мН/м	145,97	102,88	101,35	100,41	99,80	99,38	99,07	98,84	98,62	98,41	98,21

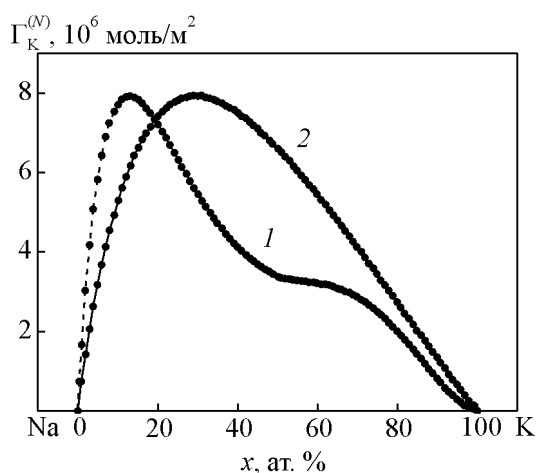


Рис. 5. Результаты расчетов адсорбции калия в сплавах Na – K при $T = 385$ K: 1 – без учета термодинамической активности K, 2 – с учетом активности K.

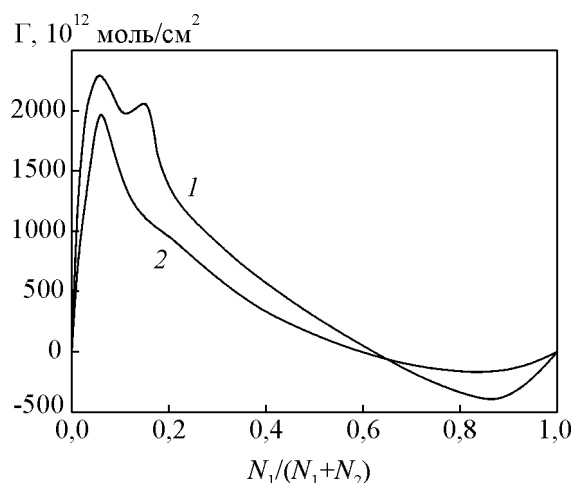


Рис. 6. Изохоры адсорбции (Γ) растворов калия с натрием: 1 – при 375 K, 2 – при 25 K [9]; N_1 и N_2 – число частиц калия и натрия в сплавах.

данных о ПН рассматриваемой системы, имеет сложный вид: при температуре 375 K обнаруживаются два максимума соответственно, в области составов 5 – 6 ат. % K и 17 – 18 ат. % K в Na (рис. 6). Изохора $\Gamma_K^{(N)}$ затем плавно спадает до нуля и переходит в отрицательную область, где она имеет значительный минимум при концентрации 80 – 90 ат. % K. По мере повышения температуры происходит постепенное сглаживание и исчезновение второго, меньшего, максимума (рис. 6, кривая 1).

Если величина и положение первых максимумов согласуются с теорией поверхностных явлений В. К. Семенченко [32], то наличие вторых максимумов не могут быть объяснены в рамках этой теории: обра-

щение в нуль значения адсорбции калия для сплава с содержанием 60 ат. % K в Na означает равенство составов объемной фазы двухкомпонентного сплава и поверхностного слоя, что трудно себе представить. Подобный ход знакопеременной изохоры адсорбции калия связан, в первую очередь, с наличием экстремума на изохоре ПН Na – K, полученной в [13]. В этой же работе авторы отмечают, что при расчетах адсорбции с учетом термодинамической активности калия вместо его концентрации, вторые максимумы должны исчезнуть, а величина первого максимума должна возрасти и сместиться в сторону больших концентраций калия.

Из наших расчетов адсорбции K в сплавах системы Na – K с учетом его термодинамической активности (рис. 5, кривая 2) следует, что учет активности K действительно приводит к существенно отличным результатам: положение пика на адсорбционной кривой, рассчитанной без учета термодинамической активности калия, “приходится” на состав с содержанием около 13 ат. % K в Na (рис. 5, кривая 1) и по ширине значительно уже, чем с учетом термодинамической активности (рис. 5, кривая 2). Таким образом, положение пика на концентрационной зависимости адсорбции K с учетом его активности смещается вправо вдоль оси составов, достигая в новом положении сплава с содержанием около 30 ат. % K в Na.

Выводы

1. Впервые при одной заправке цельнопаянного прибора обоими чистыми компонентами и в полном концентрационном интервале составов измерены температурные и концентрационные зависимости поверхностного натяжения системы Na – K.

2. Температурные зависимости поверхностного натяжения сплавов натрия с калием линейно убывают с температурой. Наибольшие по абсолютной величине ТКПН имеют место для сплавов с малыми концентрациями калия в сплавах на основе натрия.

3. Не подтвержден ранее отмеченный в литературе минимум на изохоре ПН сплавов системы натрий – калий вблизи эвтектического состава.

4. Калий положительно адсорбируется на поверхности расплавов во всем концентрационном интервале составов и проходит через максимум вблизи сплава с содержанием около 13 ат. % K в Na. При учете термодинамической активности калия максимум на адсорбционной кривой смещается вправо вдоль оси составов и соответствует в новом положении составам сплавов с содержанием около 30 ат. % K в Na.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и МОН КБР по Проекту № 09-08-96531 "p_a_юг".

Литература

1. Быстров П.И., Каган Д.Н., Кречетова Г.А. и др. Жидкометаллические теплоносители тепловых труб и энергетических установок. М.: Наука, 1988, 263 с.
2. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Щелочные металлы и сплавы с их участием — перспективные материалы современной техники и энергетики. Сб. "Физика и химия перспективных материалов". Нальчик: КБГУ, 1998, с. 40 – 44.
3. Ивановский М.Н., Логинов Н.И., Миловидова А.В. и др. Натрий - калиевый сплав эвтектического состава — теплоноситель космических ядерных энергетических установок. Теплофизические свойства веществ (жидкие металлы и сплавы) Труды межд. семинара, 11 – 15 июня 2001 г., Нальчик: КБГУ, 2001, с. 116 – 120.
4. Морозов В.А., Арнольд М.Н., Логинов Н.И. Натрий-калиевая эвтектика. Физико-химические исследования. Тезисы докладов межведомственного семинара "Технология щелочных жидкометаллических теплоносителей" (Теплофизика – 2009), г. Обнинск, 28 – 30 октября 2009 г., Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ, с. 64 – 71.
5. Шебзухов А. А., Осико Т. П., Кожокова Ф. М., Мозговой А. Г. Поверхностное натяжение жидких щелочных металлов и сплавов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М.: ИВТАН, 1980, № 5 (31), 142 с.
6. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение щелочных металлов и сплавов с их участием. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М.: ИВТАН, 1991, №3 (89), 4 (90), 180 с.
7. Keene B. J. Review of data for surface tension of pure metals. International Materials Reviews, 1993, v. 38, no. 4, p. 157 – 192.
8. Allen Benjamin C. Handbook of Thermodynamic and transport Properties of Alkali Metals. Chapter 6.8.: Surface Tension. Editor R.W. Ohse, UPAC. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985, p. 691 – 700.
9. Лебедев Р.В., Пугачевич П.П. Поверхностное натяжение и адсорбция в растворах щелочных металлов. ЖФХ, 1969, т. 43, № 5, с. 1286 – 1287.
10. Ewing C.T., Atkinson H.V. Properties of Na – K alloy. NRL, 1948. Report № C-3887.
11. Bradhurst D. N., Buchanan A.S. Surface properties of liquid sodium and Na-K alloys in contact with metal oxide surface. Austral. Journ. Chem., 1961, v. 14. p. 397 – 401.
12. Лебедев Р.В. Измерение межфазного натяжения сплавов натрия с калием. Изв. ВУЗов. Физика, 1972, № 12, с. 155 – 158.
13. Лебедев Р.В., Пугачевич П.П., Задумкин С.Н. Поверхностное натяжение в расплавах щелочных металлов и их растворов. В кн.: Физическая химия поверхностных явлений в расплавах. Киев: Наукова Думка, 1971, с. 157 – 159.
14. Осико Т.П., Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение бинарных расплавов щелочных металлов. Сплавы натрия – калия. ТВТ, 1987, т. 25, № 4, с. 809 – 812.
15. Ибрагимов Х.И., Покровский Н.Л., Пугачевич П.П. О некоторых методических вопросах измерения поверхностного натяжения жидких металлов. Научные труды 2-ой Всесоюзной научной конференции по поверхностным явлениям в расплавах и возникающих из них твердых фазах "Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах", 25 – 30 ноября 1964 г., Нальчик, Кабардино-Балкарский госуниверситет. Нальчик: КБГУ. Кабардино-Балкарское книжн. изд-во, 1965, с. 198 – 210.
16. Покровский Н.Л., Ибрагимов Х.И. К анализу экспериментальных изотерм поверхностного натяжения двойных металлических систем. В кн.: Физическая химия поверхности расплавов. Тбилиси: Мецниереба, 1977, с. 30 – 38.
17. Addison C.C., Addison W.E., Kerridge D.H. The influence of oxide films on the surface tension of liquid sodium. Journ. of the Chemical Society, 1955, № 9, p. 3047 – 3050.
18. Унежев Б.Х., Задумкин С.Н., Карашаев А.А. Влияние газовой среды на поверхностное натяжение жидких металлов. В кн.: Электрохимия и расплавы. М.: Наука, 1974, с. 111 – 118.
19. Borgstedt H.U. Solution of Oxygen in liquid Alkali Metals. In: Handbook of Thermodynamic and transport Properties of Alkali Metals. Editor R.W. Ohse, UPAC. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985, p. 901 – 909.
20. Ивановский М.Н., Морозов В.А., Шимкевич А.Л., Шматко Б.А. О растворимости кислорода в щелочных металлах. ТВТ, 1983, т. 21, № 5, с. 909 – 912.
21. Алчагиров А.Б., Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Прибор для определения поверхностного натяжения и работы выхода электрона металлических растворов в полном концентрационном интервале составов. Патент № 2086957 от 10.08.1997 г.
22. Алчагиров Б.Б., Дадашев Р.Х. Метод большой капли для определения плотности и поверхностного натяжения металлов и сплавов. Нальчик: Каб.-Бал. Ун-т, 2009, 94 с.
23. Алчагиров Б.Б., Чочаева А.М. К методу большой (лежащей) капли: влияние негоризонтальности подложки на точность определения поверхностного натяжения. ПТЭ, 1998, № 3, с. 131 – 133.
24. Алчагиров Б.Б., Лазарев В.Б., Хоконов Х.Б. Работа выхода электрона щелочных металлов и сплавов с их участием. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. М.: ТФЦ, РАН, 1989, №5 (79), 4(90), 146 с.
25. Алчагиров Б.Б., Афаунова Л.Х., Архестов Р.Х., Таова Т.М. К вопросу об адсорбционной кривой бинарной системы натрия-калий. Тезисы докладов межведомственного семинара "Технология щелочных жидкометаллических теплоносителей" (Теплофизика – 2009), г. Обнинск, 28 – 30 октября 2009 г., Обнинск: ОНТИ ГНЦ РФ ФЭИ, с. 37 – 39.

26. Алчагиров Б.Б. Связь поверхностной энергии с работой выхода электрона бинарных металлических растворов. Журнал физ. хим., 1990, т. 64, № 11, с. 2983 – 2987.
27. Шебзухов А.А., Осико Т.П. К электронно-статистической теории поверхностной энергии бинарных металлических сплавов. Сб.: Физика межфазных явлений. Нальчик: Кабардино-Балкарский госуниверситет, 1977, вып. 2, с. 17 – 24.
28. Шебзухов А.А. Теории поверхностной сегрегации в концентрированных растворах. Поверхность. Физика, химия, механика. 1983, № 9, с. 31 – 39.
29. Попель С.И. О критериях поверхностной активности компонентов. В кн.: Поверхностные явления в расплавах. М.: Metallurgia, 1994, 440 с.
30. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б., Чочаева А.М. Расчеты адсорбции компонентов, состава и толщины поверхностных слоев бинарных металлических растворов: Учебно-методическое пособие. Нальчик: КБГУ, 2004, 58 с.
31. Алчагиров Б.Б., Афаунова Л.Х., Таова Т.М. и др. Расчет адсорбции калия в сплавах натрий-калий: учет активности компонентов. Вестник КБГУ, сер. Физические науки, 2009, вып. 12, с. 9 – 11.
32. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М.: Гостехтеориздат, 1957, 491 с.

Алчагиров Борис Батоквич — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области эмиссионной электроники, молекулярной физики, теплофизики и материаловедения. E-mail: alchg@kbsu.ru.

Афаунова Лиана Хазраталиевна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), аспирант. Специалист в области теплофизики и материаловедения.

Дышекова Фатима Феликсовна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), аспирант. Специалист в области теплофизики и материаловедения.

Кегадуева Зарета Арсеновна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), аспирант. Специалист в области теплофизики и материаловедения.

Мозговой Александр Герасимович — Институт физико-технических проблем энергетики ОИВТ РАН (г. Москва), кандидат технических наук, зам. директора. Специалист в области молекулярной физики, теплофизики и материаловедения. Скончался в 2010 г.

Архестов Руслан Хусенович — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), кандидат физико-математических наук, доцент. Специалист в области молекулярной физики, теплофизики и материаловедения.

Таова Тамара Мухамедовна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), кандидат физико-математических наук, доцент. Специалист в области молекулярной физики, теплофизики и материаловедения.

Хоконов Хазратали Бесланович — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой. Специалист в области эмиссионной электроники, молекулярной физики, теплофизики и материаловедения.