

# ВОДОРОД И СПЛАВЫ НАТРИЯ И КАЛИЯ

**М.Н.Арнольдov, М.Н.Ивановский, В.А.Морозов, С.С.Плетенец**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского, г.Обнинск*



Приведены данные по параметрам растворимости водорода в эвтектическом сплаве натрия и калия и некоторые сведения по системе «натрий-калий-водород». Термодинамический анализ этих данных показывает, что известный разброс значений растворимости, давления диссоциации гидридов, константы Сивертса, главным образом, определяется неопределенностью концентрации кислорода в сплавах. Выбраны эталонные данные и область их применимости в практической технологии.

В 60-е гг. в ФЭИ был выполнен ряд исследований, приведших к освоению натрий-калиевого теплоносителя [1]. Одним из них было изучение растворимости водорода в эвтектическом сплаве натрия и калия. За прошедшие 30 лет значительно изменились представления о природе жидкометаллических растворов, получены новые данные. Однако фундаментальные результаты тех исследований не потеряли ценности и по сей день. Для того, чтобы они не были утеряны и их можно было использовать в дальнейших работах, мы приводим их табличные значения вместе с попыткой проанализировать их несовершенство. Основной упор будет сделан на эвтектический сплав, данные по другим сплавам будут привлекаться по мере необходимости в виде графиков.

Все результаты получены методом горячего объема на однотипных установках, описание которых приведено в работах [2], [3]. Давление водорода измерялось непосредственно над сплавом, за исключением высокотемпературных исследований, где равновесие устанавливалось через никелевую мембрану. Инструментальная погрешность данных, по нашим оценкам, составляла ~10%, [2], однако методические ошибки не определялись, для этого надо бы иметь эталон.

Из общих соображений ясно, что источниками погрешностей, кроме инструментальных, которые могут быть снижены применением более совершенной техники, являются утечки водорода в окружающую среду, неравновесность, дисперсность одной из сосуществующих фаз, которая может изменить число степеней свободы системы за счет влияния поверхностных сил, химическое взаимодействие водорода с элементами, связывающими его в более прочные соединения, чем гидрид изучаемого металла и т.п.

В наших опытах влияние утечек (растворимость в материале контейнера, проникновение в атмосферу) минимизировалось увеличением массы исследуемого металла (1 кг), что снижает отношение поверхности утечек к объему их источника, а также применением защитного слоя (сплав Pb-Bi), не пропускающего водород [3]. В опыте [2] для этого использовалась мешалка, сокращающая время взаимодействия водорода со сплавом и устраняющая влияние неравновесности. Утеч-

ки влияют на измерение величины растворимости  $S$  и константы Сивертса ( $C_H/\sqrt{P_{H_2}}$ ), но не на величину давления водорода над насыщенным раствором, поэтому оно измерено наиболее точно. По оценкам проницаемость водорода дала поток не более  $10^{-3}$  ppm H/ч, растворение в материале контейнера  $\sim 1$  ppm H.

Неравновесность по температуре составляла  $\sim 3$  К, использовалась для перемешивания металла в опытах [3] и вносила вклад в погрешность измерения температуры  $\sim 0,5\%$ . Неравновесность давления водорода, особенно при низких температурах, над насыщенным раствором оценивается в  $\sim 12\%$ :  $\lg(P \pm \Delta P)/P = \pm B\Delta T/T^2 = 5\%$ , что соответствует  $\Delta P/P \sim 12\%$  при 600 К, где  $B=6000$  - температурный коэффициент в уравнении

$$\lg P_{H_2} = A - \frac{B}{T}. \quad (1)$$

Влияние дисперсности избыточной фазы в жидкометаллическом растворе в настоящий момент не поддается оценке вследствие отсутствия данных по межфазной энергии и размерам частиц твердой фазы. Однако оно проявляется в окрестности точки насыщения и по отклонению от зависимости Сивертса, в принципе, можно найти погрешность оценки растворимости:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\sigma}{r}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  - межфазная энергия «расплав-твердая частица»,  $r$  - радиус этой частицы.

Абсолютная величина этого отклонения  $\Delta C$  может достигать 10-15 ppm H, что в области концентраций  $\sim 200$  ppm составляет неопределенность  $5\div 7\%$ .

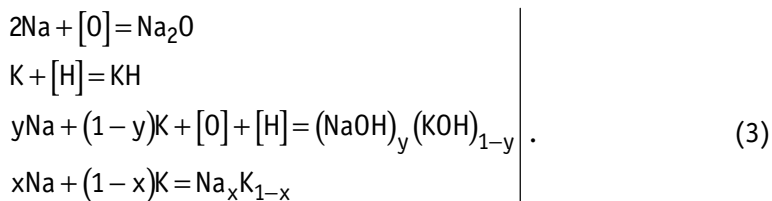
Основное влияние на экспериментальные результаты оказывает взаимодействие водорода с другими примесными элементами, главным образом, с кислородом. Кислород, являясь основной примесью щелочных металлов, всегда присутствует в экспериментальных установках либо в виде истинного раствора в жидком металле, либо в форме дисперсных частиц сложных оксидов, образовавшихся в результате взаимодействия расплава с поверхностными оксидами конструкционного материала [4]. Он образует в натрии, калии и их сплавах весьма устойчивые гидроксиды NaOH и KOH, которые термодинамически являются более прочными, чем гидриды этих металлов NaH и KH.

При термодинамическом анализе влияния кислорода на результаты изучения растворимости водорода в сплавах натрия и калия, главным образом, в эвтектическом сплаве, важно знать, в каких формах находятся продукты реакции натрия и калия с кислородом и водородом. Давно установлено, что кислород в эвтектике находится в форме  $Na_2O$  [1]. По данным [5] в системе Na-K-NaOH-KOH гидроксидная фаза является комплексной, состоящей примерно из равных мольных долей NaOH и KOH при эвтектическом составе сплава. Будем придерживаться этой версии. Водород в эвтектическом сплаве по данным [3] и [6] находится в форме гидрида калия KH. Об этом свидетельствует приведенная на рис. 1 диаграмма (изобра) состояния насыщенных растворов водорода в системе Na-K-H при  $P=13,3$  кПа [7]. Видно, что гидриды NaH и KH не смешиваются, а образуют эвтектику при  $x=0,45$  мольной доли (м.д.) натрия, поэтому с эвтектическим сплавом находится в равновесии гидрид калия.

Следует отметить, что область существования  $Na_2O$  в эвтектическом сплаве в некоторых случаях ограничена по температуре  $\sim 473$  К. При более высоких температурах кислород в сплаве находится в равновесии с более сложными формами, зависящими от состава конструкционного материала. Для нержавеющей стали,

содержащих хром, (X18H10T) - это  $\text{NaCrO}_2$  [4]; для никеля, железа - это  $\text{Na}_2\text{O}$  с примесями оксидов никеля и железа. Обычно сложные оксиды имеют термодинамический потенциал  $\Delta G^\circ$ , который в поле активности кислорода ( $a_0$ ) представляется линией, близкой к линии  $a_0 = \text{const}$ . Поэтому всегда можно рассматривать равновесие сплава с кислородом в форме  $\text{Na}_2\text{O}$ , но при  $a_0 < 1$ . Например,  $\text{NaCrO}_2$  соответствует линии  $a_0 \sim 10^{-4}$  при активности хрома  $a_{\text{Cr}} = 1$ .

Рассмотрим подробнее систему Na-K-O-H. Основные реакции этой системы ( $x < 0,45$ ):



Дополнительно

$$\frac{1}{2}\text{H}_2 = [\text{H}]. \quad (4)$$

Решение системы (3) с учетом (4) для водорода имеет вид:

$$\lg\left(\frac{\sqrt{P}}{C_{\text{H}}}\right)_{\text{C}} = \lg\left(\frac{\sqrt{P}}{C_{\text{H}}}\right)_{\text{K}} + \frac{x}{2(1-x)-y} \cdot \frac{\Delta G_0 + \Delta G_{\text{H}} - \Delta G_{\text{OH}}}{\tilde{R}T} - \frac{2-y}{2(1-x)-y} \cdot \frac{\Delta G_{\text{C}}}{\tilde{R}T}, \quad (5)$$

где символами C, K, Na, O, H, OH обозначены величины, относящиеся к сплаву, калию, натрию,  $\text{Na}_2\text{O}$ , KH и гидроксиду, равновесному со сплавом, соответственно;

$$\Delta G_0 \equiv \Delta G_{\text{Na}_2\text{O}}^0 + \tilde{R}T \lg a_0(\text{Na}),$$

$$\Delta G_{\text{H}} \equiv \Delta G_{\text{KH}}^0 + \tilde{R}T \lg a_{\text{H}}(\text{K}),$$

$$\Delta G_{\text{OH}} \equiv y\Delta G_{\text{NaOH}}^0 + (1-y)\Delta G_{\text{KOH}}^0 + \tilde{R}T \lg a_{\text{OH}}(\text{C}),$$

$$\Delta G_{\text{C}} \equiv x\tilde{R}T \lg a_{\text{Na}} + (1-x)\tilde{R}T \lg a_{\text{K}},$$

$$\tilde{R} = 2,3R - \text{газовая постоянная},$$

где  $a_i = C_i/S_i$ , при этом концентрация (i) в чистом компоненте сплава равна концентрации в сплаве, S - растворимость, T - температура в K, P - давление водорода, x, y - мольные доли натрия в сплаве и гидроксиде соответственно.

Свободная энергия образования сплава состава x не зависит от присутствия примесей вследствие незначительной их растворимости. При этом предположении она равна  $\Delta G$  чистого сплава, в то же время активности компонентов меняются так, что  $\Delta G_{\text{C}} = \text{const}$ . Однако в процессе экспериментов при малом количестве сплава большие дозы примесей могут изменить состав сплава, вследствие чего изменяется  $\Delta G_{\text{C}}$ .

Для ненасыщенного водородом раствора при  $a_0/a_{\text{OH}} = \text{const}$  или  $a_0 = \text{const}$ ,  $a_{\text{OH}} = \text{const}$  из уравнения (5) следует, что не соблюдается закон Сиверта:

$$\lg\left(\frac{\sqrt{P}}{C_H}\right)_c = A_1 - \frac{B_1}{T} + \frac{x}{2(1-x)-y} \cdot \lg C_H. \quad (6)$$

Для насыщенного водородом раствора  $\alpha_H=1$  давление растет при  $C_{OH}=S$  с увеличением концентрации кислорода  $C_0$ :

$$\lg \sqrt{P} = A_2 - \frac{B_2}{T} + \frac{x}{2(1-x)-y} \cdot \lg C_0, \quad (7)$$

$$\lg\left(\frac{\sqrt{P}}{C_H}\right) = A_3 - \frac{B_3}{T} + \frac{x}{2(1-x)-y} \cdot \lg C_0 \quad (8)$$

при  $\alpha_{OH}=1$  и  $\alpha_0 < 1$ . Это отношение увеличивается с ростом концентрации кислорода. Это означает, что кислород уменьшает растворимость водорода в эвтектическом сплаве.

Обозначим

$$K_0 \equiv \frac{x}{2(1-x)-y}. \quad (9)$$

Для эвтектического сплава  $x=1/3$ ,  $y=0,5$ ,  $K_0=0,4$ , при  $y=0$  (KOH)  $K_0=0,25$ , при  $y=1$  (NaOH)  $K_0=1$ .

Таким образом, в присутствии кислорода линейный закон связи между концентрацией водорода и корнем квадратным из его давления изменяется на степенной, зависящий от состава сплава и гидроксида, давление насыщения растет с увеличением концентрации кислорода, а растворимость падает.

При обработке данных в координатах  $\sqrt{P} = f(C_H)$  кривизна сглаживается ввиду того, что это зависимость от общего введенного водорода, а не равновесного (6-8), не связанного с кислородом. Если ввести коэффициент распределения

$$K_p \equiv \frac{C_{OH}}{C_H}, \quad (10)$$

то получим криволинейную зависимость давления от концентрации равновесного водорода  $C_H$

$$\sqrt{P} = f\left(\frac{C_H^0}{1+K_p}\right), \quad (11)$$

$C_H^0 = C_H + C_{OH}$  - общее количество водорода в системе,  $C_{OH}$  измеряется в водородных массах, истинная масса OH в 17 раз больше.

Коэффициент распределения находится из экспериментальных данных по формуле:

$$K_p = \left(\frac{C_H^0}{\sqrt{P}}\right) \cdot \left(\frac{d\sqrt{P}}{dC_H}\right)_0 - 1, \quad (12)$$

при этом  $(d\sqrt{P}/dC_H)_0$  берется для сплава, насыщенного кислородом.

Рассмотрим полученные экспериментальные данные, приведенные в табл.1 и на рис.2, и сравним их с данными [6], которые примем за эталон. Это исследование [6] проведено весьма совершенно: утечки водорода устранены применением кварцевой ампулы,

Таблица 1

**Растворимость (С, ррт) и равновесное давление водорода (Р, кПа) в эвтектическом сплаве натрия и калия**

№	Температу- ра, К	Пара- метры										
1	653	C	3	26	39	56	74	95	116	137		
		P	0,20	1,37	2,16	4.52	7,75	12,37	18,35	25,14		
		C	147	160	173	185	197	207	214			
		P	28,60	33,32	38,44	46,68	47,48	47,22	47,22			
2	653	C	9	17	26	35	44	53	61	70	79	88
		P	3,38	2,02	2,70	3,03	3,37	3,38	4,39	5,05	5,81	6.16
		C	97	106	132	158	184	210	235	262	270	
		P	7,14	8,09	12,44	17,02	23,67	31,52	46,62	46,91	50,14	
3	573	C	24	29	35	41	47	56	59			
		P	1,06	1,20	1,40	1,73	2,00	2,26	2,26			
	593	C	58	63	67	72	76	81	84			
		P	3,86	4,12	4,32	4,99	5,05	5,12	5,12			
	617	C	83	90	92	96	101	105	110	114	117	
		P	8,71	9,91	10,37	11,11	12,17	13,03	13,43	13,57	13,57	
	632	C	115	124	128	133	137	139	142	144		
		P	16,56	18,89	19,88	21.21	21,88	21,95	22,08	22,08		
	643	C	142	151	159	164	168	173	177			
		P	27,13	28,33	31,26	32,19	32,72	32,72	32,72			
	653	C	175	179	186	194	199	203	207			
		P	38,30	40,30	43,36	45,35	46,42	46,02	46,02			
4	673	C	8	24	32	42	66	92	160	220	410	
		P	2,46	2,69	3,06	3,59	4,85	7,78	14,36	21,79	56,66	
5	973	C	7	10	18	28	48	103	230	418		
		P	2,46	5,12	8,11	8,11	8,94	12,77	22,08	41,23		

внутри которой - железный контейнер со сплавом; влияние кислорода минимизировано, ибо контейнер отжигался в водороде для устранения оксидов железа, а сплав содержал ~10 ррт О; кроме того, в системе практически отсутствовали такие раскислители, как хром; равновесие между газовой фазой и жидким металлом проверялось по совпадению давления водорода при вводе и удалении одинаковых количеств газа на линии насыщения и т.п.

Приведем эти данные:

$$\begin{aligned}
 &573\text{K } S=37,8 \text{ ррт}, P_s=1729 \text{ Па} \\
 &603\text{K } S=68,4 \text{ ррт}, P_s=6118 \text{ Па} \\
 &673\text{K } S=229,3 \text{ ррт}, P_s=68761 \text{ Па} \\
 &\lg S(\text{ppm})=6,69-2990/T \\
 &\lg P(\text{Па})=14,275-6280/T \\
 &\lg K_s(\text{ppm}/\text{Па}^{1/2})=-0,444-240/T.
 \end{aligned}$$

Особенность наших данных в том, что они отражают состояние и поведение водорода в реальных жидкометаллических системах. Таким образом, данные [6] и данные наших экспериментов дополняют друг друга.

На рис.2 приведены результаты пяти опытов, отмеченных цифрами (1-5) в координатах  $\sqrt{P_{H_2}} = f(C_H^0)$ .

**Опыт 1.** 653К. Источник кислорода - поверхностные оксиды контейнера из стали X18N10T, содержание кислорода в сплаве ~10 ррт О. Поверхностный источник

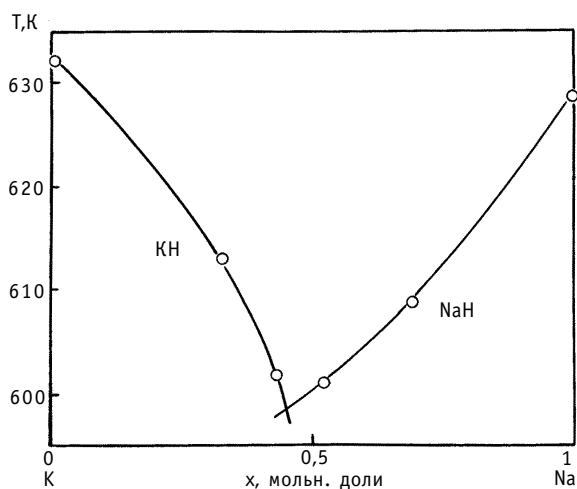


Рис.1. Изобара (13,3 кПа) системы Na-K-H

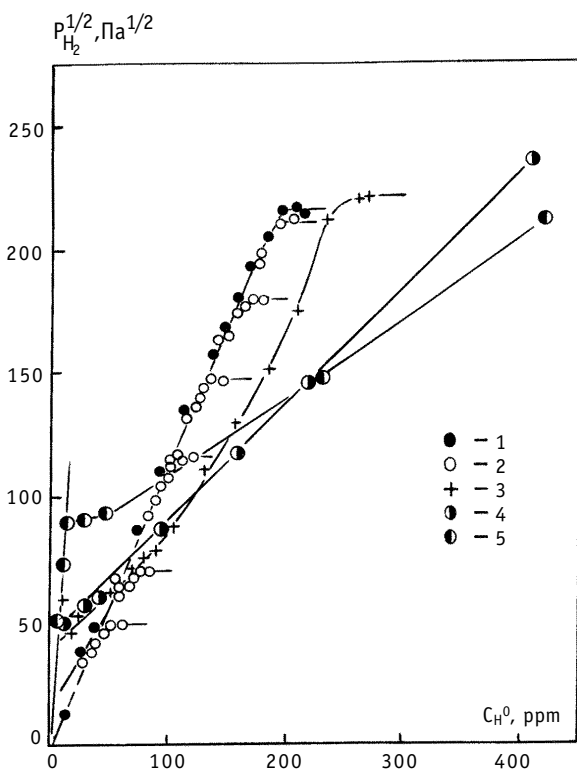


Рис.2. Зависимость давления от концентрации водорода в эвтектическом сплаве; 1-5 - номера опытов

может дать более 500 ppm O, но для его растворения в течение опыта нужен более окисленный жидкий металл.

**Опыт 2.** 653K. В сплав введено  $\sim 1500 \text{ ppm O}$ , но его концентрация может быть выше за счет растворения поверхностных оксидов стали,  $\sim 2400 \text{ ppm O}$ .

**Опыт 3.** Изотермы 573; 593; 617; 632; 642,5; 653K. Опыт проведен после слива металла предыдущего эксперимента. Загрязнение кислородом оценивается в  $\sim 1000 \text{ ppm O}$ . Оценка проводилась по наклону кривых при низких температурах и отклонению от закона Сиверта для насыщенного кислородом сплава.

**Опыт 4.** 673K. Источник кислорода не оценивался. Можно полагать, что он больше 2400 ppm O в виду того, что наклон кривой в координатах  $\sqrt{P} - C_H^0$  соответствует насыщенному состоянию по кислороду.

**Опыт 5** 973K. Повторение эксперимента после откачки водорода; кислорода более 2400 ppm O и, видимо, больше, чем в опыте 4 за счет полного растворения поверхностных оксидов контейнера в предыдущем опыте.

Рассмотрим рис. 2. Кривая 1 демонстрирует отклонение от закона Сиверта при низких и предельных концентрациях водорода с характерным минимумом давления в начале координат. Это можно было бы считать ошибкой эксперимента, если бы

не повторение его в опытах с большими концентрациями кислорода (2, 4, 5). Логично предположить, что отмеченная особенность связана с образованием гидроксида.

Кривая 1 асимптотически приближается к линейной зависимости Сиверта с увеличением концентрации водорода, но около точки насыщения отклоняется от нее, плавно переходя на линию насыщенного состояния. Видимо, это связано с развитием коррозионного процесса и образованием дисперсных частиц оксидов, на которых формируются зародыши гидридной фазы KN. Для чистых систем характерно пересыщение, т.е. максимум на линии насыщения. Именно это отмечено в дан-

ных [6] при 573K и 603K. Такой же характер, как и у кривой 1, имеют кривые 2 и 3 в окрестности насыщенного раствора.

Кривая 2 идентична кривой 1, но имеет линейный участок при низких концентрациях водорода, свидетельствующий согласно [8] о присутствии твердой фазы оксида,  $a_0=1$ . Перед линейным участком также имеется минимум, но на более высоком уровне давления водорода, а давление насыщения выше, чем в опыте 1, что подтверждает зависимость (7). Асимптота  $dC_H^0/d\sqrt{P}$  в окрестности точки насыщения меньше, чем в опыте 1, в соответствии с (5).

Кривая 3 имеет нелинейные изотермы, давление насыщения меньше, а асимптоту  $dC_H^0/d\sqrt{P}$  для 653K больше, чем в других опытах. В принципе, это объяснимо - в экспериментах 1 и 2 прошел основной коррозионный процесс на стенках контейнера, оксиды растворены в сплаве и частично удалены при сливах металла, т.е. кислорода стало меньше.

Сравнение опытов 1-3 с данными [6] для 653K показывает, что асимптоты  $dC_H^0/d\sqrt{P}$  в области насыщения и константа Сиверта [6] мало чем отличаются, а разность давлений насыщения дает различие в концентрациях кислорода максимум 3 ppm O. Если в [6]  $C_0=10$  ppm O, то в конце опытов (1-3) - 12,5 ppm O, 13 ppm O, 12 ppm O, соответственно, т.е. поверхностные оксиды сталей в конце экспериментов были переведены в гидроксидную фазу. Последнее сравнение приведено на рис. 3, на котором нет экспериментальных точек, чтобы выделить изменение давления насыщения. Видно, что отклонение давления от «эталонного» значения уменьшается с увеличением температуры, если при 573K оно составляет 36%, то при 653K - 2%. Это свидетельствует о большой концентрации кислорода при низких температурах. Вследствие такого различия в отклонениях ощутимо меняется и температурный коэффициент в уравнении давления диссоциации гидроксида. Это влечет за собой изменение уравнений растворимости и температурной зависимости константы Сиверта.

При нормальной эксплуатации установок таких высоких концентраций водорода, как в экспериментах, не допускается. Они могут появиться только в аварийных ситуациях, тогда как высокие концентрации кислорода реальны, они всегда имеют место на начальных этапах работы установок с жидкими металлами. Приведенные выше результаты указывают на то, что в последнем случае нельзя применять данные [6] по растворимости и зависимости Сиверта для оценки количества примесей в теплоносителе. Они могут быть использованы после очистки теплоносителя и выхода на рабочий режим.

Данные опытов 4 и 5 свидетельствуют о сильной загрязненности теплоносителя кислородом. Основная информация находится на начальном участке изотерм. Эти данные выявили границу существования гидроксида в поле концентраций и давлений водорода (рис.2). Минимумы давления в 4 опытах при разных температурах обозначают эту границу и указывают на то, что при образовании гидроксида в сплаве возможно пересыщение. Эта граница, видимо, слабо зависит от температуры:

$$\frac{\sqrt{P}}{C_H} \approx 6.92 \text{ Па}^{1/2} / \text{ppm}. \quad (13)$$

Ее можно интерпретировать как обратную константу Сиверта  $1/K_S$  для сплава, насыщенного кислородом. Точки пересечения этой границы с изотермами 573, 593, 653, 673, 973K дают грубую оценку растворимости  $[OH]$  в сплаве в ppm H:

$$\lg S_{OH} \approx 2.06 - \frac{780}{T}. \quad (14)$$

Другая оценка по точкам минимума на изотермах:

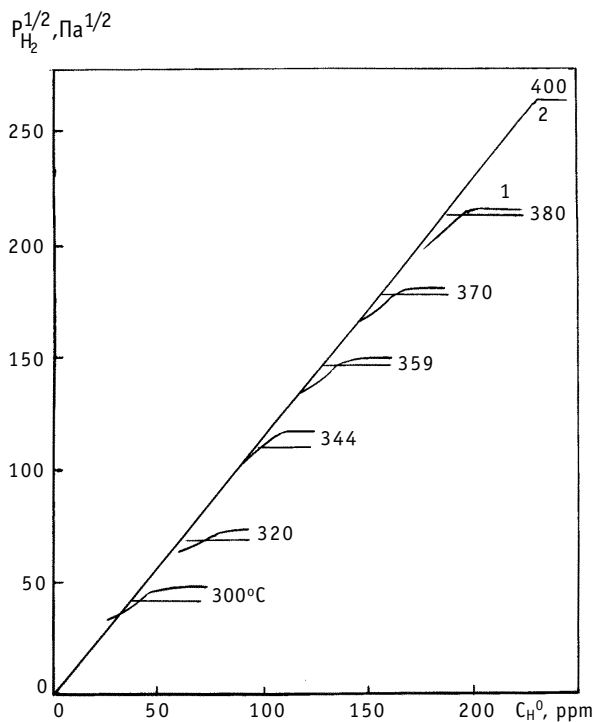


Рис. 3. Сравнение данных [2] и [6]

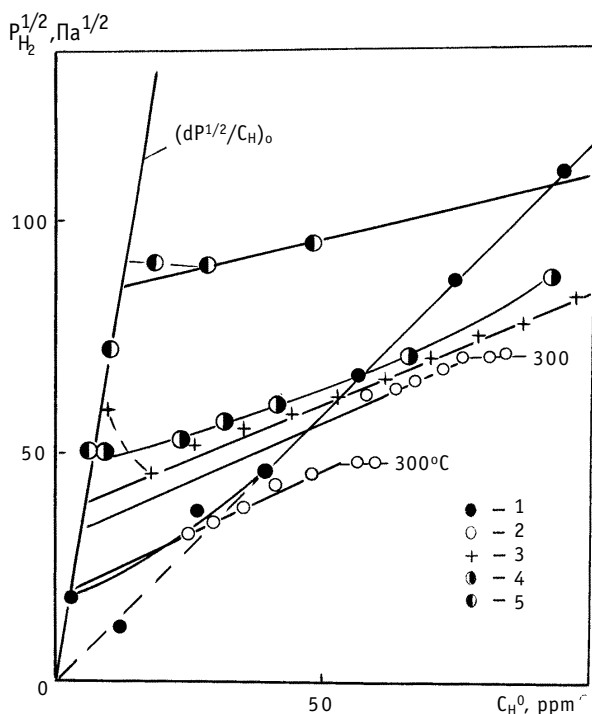


Рис. 4. Зависимость давления водорода от концентрации на начальном участке; 1-5 - номера опытов

данных в отсутствие такового. Проведенные оценки позволили выполнить лишь качественный анализ.

$$\lg S_{OH} \approx 2.07 - 570/T. \quad (15)$$

В увеличенном масштабе эта часть диаграммы  $\sqrt{P} - C_H^0$  приведена на рис. 4.

Итак, мы привели данные по растворам водорода в эвтектическом сплаве натрия и калия и краткий их анализ с позиций термодинамики. Принятая упрощенная модель взаимодействий водорода со сплавом и кислородом не может объяснить все особенности данных, однако основные моменты в рамках такого подхода находят объяснение.

1. Давление диссоциации гидрида в насыщенном растворе увеличивается с ростом концентрации кислорода.

2. Константа Сиверта и растворимость водорода уменьшаются с увеличением концентрации кислорода.

3. В насыщенном кислородом сплаве отношение  $\sqrt{P}/C_H$  зависит от концентрации свободного водорода. Эта же зависимость от полного количества водорода может быть линейной.

Все, что касается эвтектического сплава, также справедливо и для других сплавов системы Na-K-H, только в области составов при  $x > 0.45$  гидридообразующим элементом становится натрий.

Сравнение приведенных данных с данными [6] лишний раз убеждает в том, что при всей важности эталонных сведений, знание условий эксперимента весьма необходимо. При измерениях параметров состояния водорода в сплаве - это, прежде всего, контроль кислорода. Недостаток наших



Авторы выражают глубокую благодарность академику В.И.Субботину за научное руководство работами по технологии натрий-калиевого теплоносителя.

### **Список литературы**

1. Субботин В.И., Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. - М.: Атомиздат, 1970. - С. 295.
2. Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Морозов В.А., Плетенец С.С., Субботин В.И. Растворимость газов в эвтектическом сплаве натрия и калия // Атомная энергия. - 1970. - Т. 28. Вып.1. - С. 18-22.
3. Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Морозов В.А., Плетенец С.С., Ситников В.В. Растворимость водорода в расплавленном калии // Известия АН СССР. Металлы. - 1973. - № 1. - С. 74-77.
4. Ивановский М.Н., Морозов В.А., Шимкевич А.Л., Шматко Б.А. О термодинамической устойчивости сложных окислов в щелочных металлах // Теплофизика высоких температур. - 1982. - Т. 20. - № 6. - С. 1098-1101.
5. Миткевич Э.М., Шихов Б.А. Изучение реакции взаимодействия KOH-Na-NaOH-K в интервале температур 300-500°C // Журнал неорганической химии. - 1967. - Т. XII. - Вып. 4. - С. 1041-1044.
6. E.Compere, I.Savolinen. The Chemistry of Hydrogen in Liquid-Alkali-Metal Mixtures Useful as Nuclear Reactor Coolants-I. Sodium-Potassium Eutectic // J. of Nuclear Science and Engineering. - 1967. - V. 28. - P. 325-337.
7. Ивановский М.Н., Арнольдов М.Н., Морозов В.А., Моисеева Т.И., Плетенец С.С. Исследование системы натрий-калий-водород // Известия АН СССР. Металлы. - 1980. - № 1. - С. 201-205.
8. Арнольдов М.Н., Ивановский М.Н., Морозов В.А., Плетенец С.С. О формах существования смеси водорода в жидком эвтектическом сплаве натрия и калия // Теплофизика высоких температур. - 1970. - Т. 8. - № 1. - С. 88-92.

Поступила в редакцию 27.05.99.

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 530.1: 536.4

*Fluctuation Theory of Microheterogeneity of Liquid Metal Coolants* \A.L. Shimkevich; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 11 pages, 4 illustrations. - References, 32 titles.

A theory of the nonheterogeneous melts based on the calculus of variations of the Landau two parameters potential as a functional for density and composition fluctuations of a binary system is presented in this paper. Using diagram technique and "bootstrap" method, the Green functions for these fluctuations are obtained and their correlation radii are analyzed as a function of impurity concentration and model parameters.

It is shown that such the system in some conditions is characterized by impurity microheterogeneity.

### УДК 621.039.534

*Sodium Coolant in the Fast Reactor Technology* \V.M. Poplavsky, R.P. Baklushin, V.N. Ivanenko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 2 tables. - References, 5 titles.

The modern state of usage of sodium as coolant for NPP is considered. It is shown that the problems of technology of the sodium coolant, fire safety and quenching of sodium fires, interaction of sodium with water in steam generators, ecological and radiation safety are successfully solved. Methods of solution problems are briefly discussed.

### УДК 621.039.534.6

*Hydrogen and Sodium-Potassium Alloys* \M.N. Arnoldov, M.N. Ivanovski, V.A. Morozov, S.S. Pletenets; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 1 table, 4 illustrations. - References, 8 titles.

Authors data on solubility of hydrogen in the sodium-potassium eutectic alloy and an analysis of oxygen influence on hydrogen solubility parameters in the sodium-potassium system is presented in this paper. The standard data is determined.

### УДК 621.039.534.63

*Chromium and Nickel Mass Transfer in a Circulating Sodium Loop* \V.V. Alekseev, F.A. Kozlov, Yu.I. Zagorulko, N.D. Kraev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 3 tables, 5 illustrations. - References, 5 titles.

Description of the model of impurities mass exchange in cooled channels of the circulating sodium loop is given. On the hightemperature section of experimental sodium loop the examinations of transfer of nickel and chromium formed by dissolution of nickel, chromium and stainless steel in sodium are made. On the basis of these experiments physical constants describing the mass transfer of the impurities depending on dissolving materials are obtained. Mutual influence of the impurities on their mass transfer in sodiums is shown.

### УДК 541.15

*Corrosion and Mass Transfer of Structural Materials in Sodium and Sodium-Potassium Coolants* \N.D. Kraev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. - References, 28 titles.

Experimental results on the influence of temperature, flow velocity, oxygen and corrosion product concentration in sodium and sodium-potassium (22% sodium) coolants on corrosion resistance of various reactor materials is generalized in this paper.

### УДК 621.039.533 : 519.55

*The Diffusion Model of Intergranular Corrosion of Steels in Alkali Metals* \I.V. Pyshin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 7 pages, 3 illustrations. - References, 8 titles.

The process of intergranular corrosion in loops with liquid metal coolant has been simulated. The coolant penetration to a structural material is considered at edge graph of the polycrystalline structure of a loop material.

### УДК 621.039.7 (088.8)

*Neutralization of a Radioactive Wastes of Alkali Metals by Processing in Alkaline Solution and Solidification in Geocement* \S.N. Skomorokhova, E.Ey. Kononov, O.V. Starkov, E.A. Kochetkova, V.S. Kopylov, T.V. Poletakhina, E.M. Triphanova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika"