

КОЛЛОИДНАЯ ХИМИЯ

УДК 532.Б4

КОРРЕЛЯЦИЯ ВЯЗКОСТИ ГАЗОВ С ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

Б.Д. Сумм

(кафедра коллоидной химии)

Молекулярно-кинетическое уравнение вязкости газа η сопоставлено с волновым уравнением де Бройля. Показано, что из этого сопоставления следует корреляция $h = \eta_m V_A$, h – постоянная Планка, η_m – минимальная вязкость газа, V_A – атомный (молекулярный) критический объем. Приведенное соотношение с высокой точностью выполняется для He, Ne, Ar при 60 К. Для ряда других газов отношение $(\eta_m V_A)/h$ составляет при достаточно низких температурах 0,5 – 2,0.

В молекулярно-кинетической теории газов возникновение вязкости связывают с переносом количества движения от более быстрых молекул к более медленным. В свою очередь движение молекул и их взаимодействия описываются на основе механики. Поэтому возможность количественной связи динамической вязкости газа η (Па · с) с квантом действия h представляется на первый взгляд весьма спорной.

Для обоснования этой корреляции отметим важные следствия анализа размерности: произведение $\eta \cdot V$ имеет такую же размерность (Дж · с) как и постоянная Планка h . Здесь V (м³) – объем, конкретный смысл которого рассмотрим ниже. Используем далее уравнение вязкости газа, следующее из молекулярно-кинетической теории в так называемом приближении длины свободного пробега δ [1]:

$$\eta = 1/3 \delta \cdot U \cdot N \cdot m, \quad (1)$$

где U – средняя скорость движения молекул, N – число молекул в единице объема, m – масса молекулы.

Сопоставим (1) с волновым уравнением де Бройля:

$$h = m \cdot \omega \cdot \lambda, \quad (2)$$

где m – масса частицы, движущейся со скоростью ω , λ – длина сопутствующей волны. Используем (2) для молекул газа, тогда $\omega = U$.

Из (1) и (2) получаем:

$$h = \eta \cdot 1/N \cdot 3\lambda/\delta, \quad (3)$$

Величина N зависит от давления и температуры T . Для фиксации этих величин дальнейшие расчеты будем относить к критическому состоянию газа. Тогда $N = N_A/V_K$, где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро, V_K (м³ · моль⁻¹) – критический объем. В критическом состоянии длина свободного пробега δ ми-

нимальна и по порядку величины составляет несколько атомных диаметров. Поэтому в первом приближении можно принять $3\lambda/\delta = 1$. После указанных подстановок получаем

$$h = \eta_k \cdot V_A, \quad (4)$$

где $V_A = V_K/N_A$ – критический объем газа в расчете на один атом (молекулу), η_k – вязкость газа в критическом состоянии. В справочниках значения η_k отсутствуют, поэтому ниже использовали минимальную вязкость газов η_m , измеренную при минимальной (для данного газа) температуре T_m . В итоге использовали уравнение

$$h = \eta_m \cdot V_A \quad (5)$$

Расчеты выполнены для инертных и биатомных газов (элементов), а также для нескольких неорганических и органических веществ по справочным данным [2].

Приведенные в таблице результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Произведение $\eta_m \cdot V_A$ имеет такой же порядок величины 10^{-34} Дж · с как квант действия h . Для большинства газов отношение $(\eta_m \cdot V_A)/h$ находится в интервале 0,5 – 2,5.

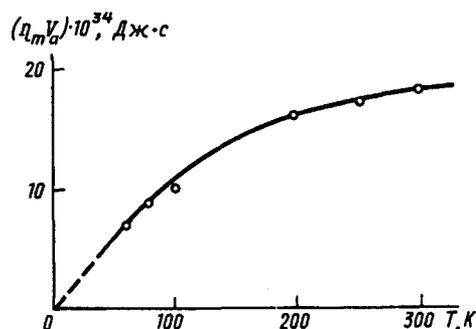
2. Для трех инертных газов (He, Ne, Ar) соотношение (5) расходится с постоянной Планка в пределах 0,6 – 1,6%. Для этих газов минимальная вязкость η_m соответствует самому низкому среди справочных данных значению температуры (60 К).

3. С ростом температуры T_m величина произведения $\eta_m \cdot V_A$ возрастает. Как показано на рисунке, в области низких температур ($T_m < 100$ К) зависимость носит линейный характер, а при $T > 100$ К она становится степенной ($n \approx 0,4$), что можно объяснить увеличением вязкости газов с ростом температуры [1].

Изменение характера температурной зависимости указывает на смену механизмов вязкости. Возможно, что

Газ	T_m, K	$\eta_m \cdot 10^6,$ Па · с [2]	$V_c \cdot 10^{-6},$ м ³ · моль ⁻¹	$V_A \cdot 10^{-29},$ м ³	$(\eta_m V_A) 10^{-34},$ Дж · с	$\eta_m V_A / h$
He	60	7.06	57.5	9.54	6.735	1.016
Ne	60	9.63	41.7	6.92	6.664	1.006
Ar	60	5.34	75.2	12.5	6.675	1.007
Kr	100	9.29	92.3	15.3	14.21	2.14
Xe	150	12.2	119.47	19.84	24.20	3.65
H ₂	60	2.91	65.5	10.9	3.17	0.48
D ₂	60	3.86	60.3	10.01	3.86	0.58
N ₂	80	5.59	92.1	15.3	8.55	1.29
O ₂	80	6.27	78.0	12.0	8.09	1.22
F ₂	100	8.56	66.2	11.0	9.41	1.42
CO	80	5.40	93.0	15.4	8.31	1.25
NO	150	10.5	58.0	9.65	10.13	1.52
NH ₃	200	6.89	73.1	12.13	8.36	1.26
CH ₄	200	7.76	100	16.61	12.88	1.94
C ₂ H ₄	200	7.1	124	20.6	14.63	2.21
SO ₂	200	8.62	122	20.3	17.5	2.64
N ₂ O	200	10	97.27	16.2	16.2	16.2
C ₂ H ₆	200	6.43	148	24.9	15.8	2.38
CO ₂	200	10.2	94	15.4	15.7	15.7
CH ₃ OH	250	8.3	118	19.6	16.27	2.45
HCN	300	7.58	139	23.1	17.5	2.64

при низких температурах доминирующую роль играет интерференция дебройлевских волн, а не столкновение молекул. Подобный механизм был предложен Бриллюэном для вязкости жидкостей вблизи 0 К [3]. Приведенные результаты показывают, что этот механизм может действовать и в газах.



Температурная зависимость средних значений произведения $\eta_m \cdot V_A$ (η_m – вязкость газа при данной температуре, V_A – критический объем газа, отнесенный к одному атому (молекуле))

4. Для водорода и дейтерия произведение минимальной вязкости и критического объема газа, измеренных при 60 К ($\eta_m \cdot V_A \approx 0,5h$), в 2 раза меньше, чем для гелия, неона и аргона (при той же температуре), что можно объяснить различием степеней свободы i (соответственно 5 и 3). Возможно, что при низких температурах на силу вязкого трения влияют только поступательные степени свободы. Тогда вязкость одноатомного газа будет в 5/3 раза больше, чем двухатомного.

Таким образом, в определенном интервале температур предлагаемая корреляция $\eta = f(h)$ выполняется достаточно удовлетворительно, на основании чего можно сделать вывод о квантовом характере механизма вязкости при низких температурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левич В.Г. Курс теоретической физики. М., 1962.
2. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М., 1991. С.315, 364.
3. Панченков Г.М. Теория вязкости жидкостей. М.; Л., 1947.

ХИМИЯ И ФИЗИКА ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

УДК 546.3 – 19'654'621'74'11

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА С $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98}$

Р.А.Сиротина, Т.В.Иванова, О.В.Терехова, В.Н.Вербецкий

(кафедра химии и физики высоких давлений)

Исследовано взаимодействие $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98}$ с водородом в области давлений <60 атм при $319 - 605$ К с использованием дифференциального автоматического калориметра типа Тиана – Кальве, соединенного с установкой для дозированной подачи газа. Построены изотермы абсорбции и десорбции $P - X$ и $|\Delta H_{a(n)}| - X$, где $X = \text{H/ИМС}$. Установлено существование при $319 < T < 407$ К двух областей, в которых $|\Delta H_{a(n)}|$ сохраняет постоянные значения, что позволяет сделать предположение о существовании двух гидридных фаз. Для составов, содержащих одинаковое количество водорода, обнаружено уменьшение величины $|\Delta H_{a(n)}|$ с повышением температуры эксперимента. Установлено, что $T = 605$ К является близкой к критической.

Начиная с 1968 – 1970 гг., когда впервые был обнаружен эффект обратимого взаимодействия с водородом ряда интерметаллических соединений (ИМС) структурного типа CaCu_2 [1 – 4], многие исследователи уделяли внимание не только технологическим аспектам аккумуляирования водорода, но и физико-химическому исследованию систем ИМС – водород. Однако к настоящему времени существует довольно ограниченный круг работ, посвященных исследованию систем ИМС (металл – H_2) в широком интервале температур и давлений водорода методом калориметрии. В основном они сделаны для системы $\text{Pd} - \text{H}_2$, которая может рассматриваться как модельная при изучении систем металл – H_2 . По нашему мнению, наиболее интересным в исследовании взаимодействия в системе ИМС – H_2 методом калориметрии является изучение влияния температуры проведения реакции на термодинамику процесса. Ранее нами было изучено взаимодействие в системе $\text{Zr}_{0,8}\text{Ti}_{0,2}\text{CrFe} - \text{H}_2$ [5] в интервале температур $318 - 584$ К и показано ее влияние на величины энтальпий реакций абсорбции (десорбции) водорода $\Delta H_{a(n)}$ этим соединением. Для дальнейших исследований в этом направлении нами была выбрана система $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98} - \text{H}_2$. Выбор этого ИМС объясняется тем, что в области гомогенности $\text{LaNi}_{5,25}$ равновесное давление десорбции водорода из гидрида на основе $\text{LaNi}_{5,25}$ снижается по мере уменьшения содержания Ni. Замещение 20% Ni на Al в LaNi_4 приводит к еще большему понижению равновесного давления десорбции, что благоприятствует решению поставленной перед нами задачи по исследованию изменения $\Delta H_{a(n)}$ в более широком интервале температур в условиях ограниченного интервала давлений водорода. Взаимодействию с водородом близкого по составу соединения LaNi_4Al посвящено довольно много работ, в которых проводится построение $P - C$ -изотерм, а определение $\Delta H_{a(n)}$ ограничивается расчетом этой величины по уравнению Вант –

Гоффа. Авторами работы [6] проведено калориметрическое определение ΔH_d рассматриваемой реакции, но только при температуре 298 К.

В настоящей работе методом калориметрии исследовано взаимодействие с водородом соединения $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98}$ в интервале температур $319 - 605$ К при давлении водорода <60 атм.

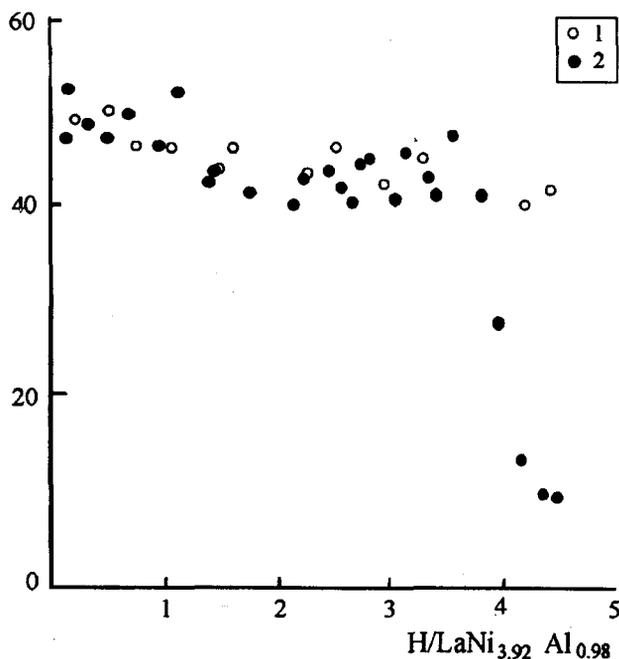
 $|\Delta H_{a(n)}|$, кДж/моль H_2 

Рис 1. Зависимость дифференциальной мольной энтальпии абсорбции водорода от его содержания в $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98}$ при $T=319$ К (1 – литературные данные, 2 – экспериментальные данные)

**Зависимость энтальпии реакции в системе
LaNi_{3,98}Al_{0,92} – H₂ от температуры**

T, K	Содержание H ₂	(ΔH _{a(д)} ± δ), кДж/моль H ₂
319	0.2 < X < 1.2	49.2 ± 0.9
	1.4 < X < 3.4	41.8 ± 0.4
336	0.3 < X < 1.0	46.6 ± 1.0
	1.3 < X < 3.6	41.3 ± 0.5
407	0.2 < X < 1.6	46.5 ± 0.3
	1.7 < X < 3.1	40.9 ± 0.3
523	0.9 < X < 2.3	42.3 ± 0.7
566	0.8 < X < 1.3	42.8 ± 0.9
605	1.0 < X < 1.2	37.9 ± 0.6

Примечание. Точность определения граничных составов ± 0.1 X.

Методика эксперимента

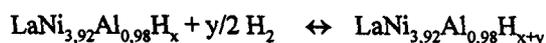
Для изучения системы LaNi_{3,92}Al_{0,98} – H₂ был применен калориметрический метод с использованием калориметра типа Тиана – Кальве, соединенного с установкой для дозированной подачи газа. Схема калориметрической установки приведена в работе [7]. В качестве источника водорода использовали аккумулятор на основе гидридной фазы LaNi₃H_x.

Исследуемый образец готовили сплавлением шихты из лантана электролитического (чистотой 99,99%), никеля электролитического (чистотой 99,99%), алюминия (чистотой 99,999%) в электродуговой печи с нерасходуемым вольфрамовым электродом на водоохлаждаемом медном поду под давлением очищенного аргона около 2 атм. Соединение LaNi_{3,92}Al_{0,98} кристаллизуется в структурном типе CaCu₃, периоды решетки a = 5,02 ± 0,02 Å и c = 4,10 ± 0,02 Å, что близко к величинам, приведенным в работе [8] для LaNi₄Al (a = 5,066, c = 4,070 Å). Количество водорода в образце рассчитывали по уравнению Ван-дер-Ваальса в области P < 20 атм и по модифицированному уравнению Ван-дер-Ваальса в области P > 20 атм [9]. Погрешность измерения выражали как квадратичную ошибку среднего результата

$$\delta^2 = \sum \Delta^2 [n(n - 1)]^{-1},$$

где δ – отклонение результата от среднего, n – количество измерений.

Дифференциальные молярные энтальпии абсорбции (десорбции) ΔH_{a(д)} определяли по тепловому эффекту реакции



Определенная таким образом величина ΔH_{a(д)} соответствует середине интервала изменения содержания водорода в ИМС при абсорбции (десорбции) очередной порции водорода. Количество абсорбированного (десорбированного) водорода составляло (100 – 800) · 10⁻⁶ молей. Соединение LaNi_{3,92}Al_{0,98} поглощает водород обратимо, поэтому для всех измерений была использована одна навеска ИМС, равная 3711 · 10⁻⁶ молей LaNi_{3,92}Al_{0,98}.

Результаты и обсуждение

Система LaNi_{3,92}Al_{0,98} – H₂ исследована нами в интервале температур 319 – 605 К и получены зависимости P_{равн} – X и |ΔH_{a(д)}| – X, где P_{равн} – значение равновесного давления десорбции (абсорбции) водорода, X = H/LaNi_{3,92}Al_{0,98}. При температуре 319 К десорбция водорода происходит очень медленно по причине низкого равновесного давления в рассматриваемой системе, поэтому при этой температуре получена только изотерма абсорбции водорода.

На рис.1 приведена зависимость |ΔH_a| – X при температуре 319 К в сопоставлении с литературными данными, полученными в работе [6] калориметрическим методом при 298 К для системы LaNi₄Al – H₂. Как видно из рис.1, полученные нами значения |ΔH_a| близки к полученным в работе [6] в интервале 0 < X < 3,3. В области, соответствующей значениям X ~ 0 (область α-раствора), уменьшения ΔH_a с ростом X, характерного для систем AB₃-H₂, нами и в работе [6] не обнаружено. На рис.1 можно выделить два интервала значений X, при которых значение |ΔH_a| постоянно: 0,2 < X < 1,2 (49,2 ± 0,9 кДж/моль H₂) и 1,4 < X < 3,4 (41,8 ± 0,4 кДж/моль H₂) (таблица). Это обусловлено наличием в системе LaNi_{3,92}Al_{0,98} – H₂ двух гидридных фаз. На существование при T = 313 – 353 К в системе LaNi₄Al – H₂ двух фаз указывают авторы работы [10], отмечая при этом, что одна из фаз является дигидридной. В нашем случае экспериментальные данные также позволяют сделать предположение об образовании двух гидридных фаз, но при этом одна из них является моногидридной, а другая имеет состав LaNi_{3,98}Al_{0,92}H₄.

Следует отметить, что переход от области плато к области β-раствора, т.е. от постоянных значений |ΔH_a| = 41,8 ± 0,4 кДж/моль H₂ к значениям |ΔH_a| < 41,8 кДж/моль H₂ проходит через максимум, равный 47,3 кДж/моль H₂ при X = 3,6. Такой “скачок” с последующим уменьшением абсолютных значений энтальпии абсорбции неоднократно отмечался для изученных ранее систем AB₃ – H₂ в области β-раствора водорода в AB₃H_x [11].

С повышением температуры эксперимента до 336 К возможно построение изотерм как абсорбции, так и десорбции (рис.2 кривые 2). Изотермы абсорбции и десорбции близки, но в интервале 3,0 < X < 4,0 значения P_{равн} для абсорбции несколько выше, чем для десорбции. Аналогичная ситуация наблюдается и при определении энтальпии абсорбции и десорбции. Из рис. 3 видно, что в этом интервале концентраций |ΔH_a| > ΔH_a, однако их средние величины достоверно не различимы. Незначительный (2 кДж/моль H₂) гистерезис энтальпии десорбции и абсорбции для системы LaNi₄Al – H₂ от-

мечали также авторы работы [6]. При температуре 336 К так же как и при 319 К можно наблюдать два интервала значений энthalпий абсорбции (десорбции): при $0,3 < X < 1,0$ значения $|\Delta H_{\text{в(д)}}| = 46,6 \pm 1,0$ кДж/моль H_2 и при $1,3 < X < 3,6$ $|\Delta H_{\text{в(д)}}| = 41,3 \pm 0,5$ кДж/моль H_2 . Переход от области плато к области β -раствора также характеризуется "скачком" $|\Delta H_{\text{в(д)}}|$ от ее величины в области плато до 50,0 кДж/моль H_2 при $X = 3,7$, однако дальнейшего резкого понижения, такого как при температуре 319 К, не наблюдается, хотя тенденция к уменьшению имеется.

При дальнейшем повышении температуры до 407 К нами получены практически идентичные кривые десорбции и абсорбции, одна из которых представлена на рис. 2 (кривая 3). В области составов $X > 1$ значения $|\Delta H_{\text{в(д)}}|$ и $\Delta H_{\text{д}}$ практически совпадают, что видно из таблицы и рис. 3. При температуре 407 К мы имеем две области постоянных значений энthalпий абсорбции (десорбции): в интервале $0,2 < X < 1,6$ значения $|\Delta H_{\text{в(д)}}| = 46,5 \pm 0,3$ кДж/моль H_2 и в интервале $1,7 < X < 3,1$ значения $|\Delta H_{\text{в(д)}}| = 40,9 \pm 0,3$ кДж/моль H_2 , что свидетельствует об увеличении области первой гидридной фазы и сокращении второй. При значениях $X > 3,1$ происходит растворение водорода в гидридной фазе и наблюдается характерный "скачок" абсолютного значения энthalпии от 41 кДж/моль H_2 при $X = 3,1$ до 50 кДж/моль H_2 при $X = 3,2$ с последующим уменьшением до 25 кДж/моль H_2 . Как видно из рис. 4 и таблицы, при дальнейшем повышении температуры происходит трансформация двух плато в одно, и при $T = 523$ К имеет место один ряд постоянных значений $\Delta H_{\text{д}} = 42,3 \pm 0,7$ кДж/моль H_2 в интервале $0,9 < X < 2,3$. При 566 К наблюдается значительное

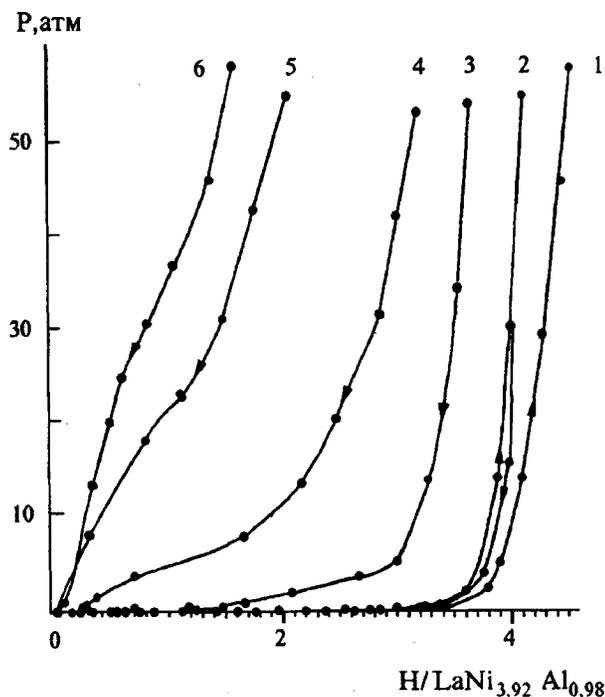


Рис. 2. Зависимость равновесного давления водорода от его содержания в $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98}$ в диапазоне температур 319 – 605 К: 1 – 319, 2 – 336, 3 – 407, 4 – 523, 5 – 566, 6 – 605 К; (→) – абсорбция, (←) – десорбция

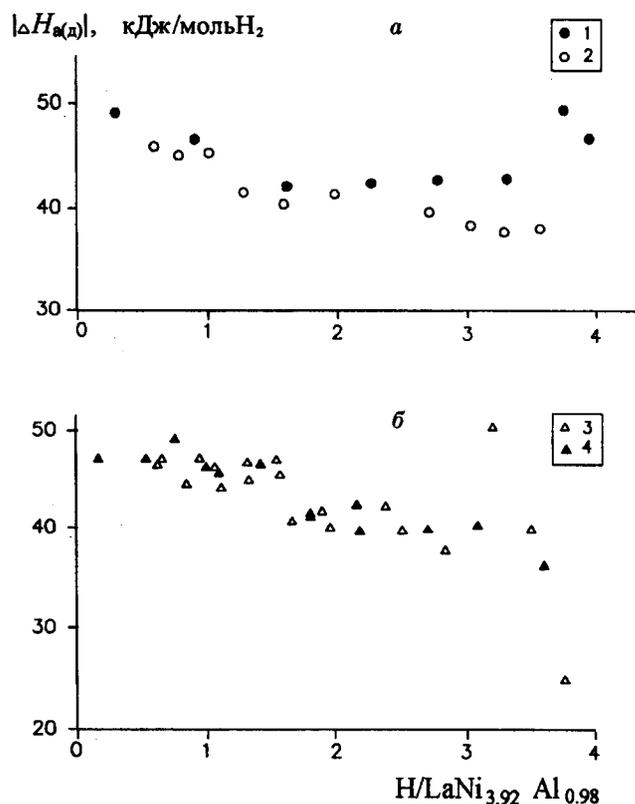


Рис. 3. Зависимость дифференциальной мольной энthalпии абсорбции (десорбции) водорода от его содержания в $\text{LaNi}_{3,92}\text{Al}_{0,98}$ при T , К: а – 336 (1 – абсорбция, 2 – десорбция); б – 407 (3 – абсорбция, 4 – десорбция)

уменьшение границ этого плато до $0,8 < X < 1,3$, а значение энthalпии десорбции, отвечающее ему, остается практически неизменным. Идентичные зависимости для этих температур получили и в области $0 < X < 0,8$. Величина энthalпии десорбции претерпевает довольно резкое уменьшение в интервале $0 < X < 0,5$ и, проходя через минимум, равный 26 кДж/моль H_2 , достигает значения плато.

Известно [11], что в системе $\text{AB}_5 - \text{H}_2$ в области α -раствора величина $|\Delta H_{\text{в(д)}}|$ уменьшается от значения, соответствующего хемосорбции водорода на поверхности AB_5 (для LaNi_5 , $X \sim 0,05$, $|\Delta H_{\text{в(д)}}| \sim 80$ кДж/моль H_2), проходит через минимум, а затем достигает значения плато. При температуре ниже 407 К для изученной системы нами такого изменения получено не было. В то же время с повышением температуры эксперимента до 523 К, когда существует только одна гидридная фаза, возникает область составов, в которой изменение энthalпии десорбции соответствует обнаруженному ранее эффекту в аналогичных системах $\text{AB}_5 - \text{H}_2$ [12] в области α -раствора водорода, но не носит такой ярко выраженный характер. При температурах 523 и 566 К она отвечает области $0,2 < X < 0,8$. Как

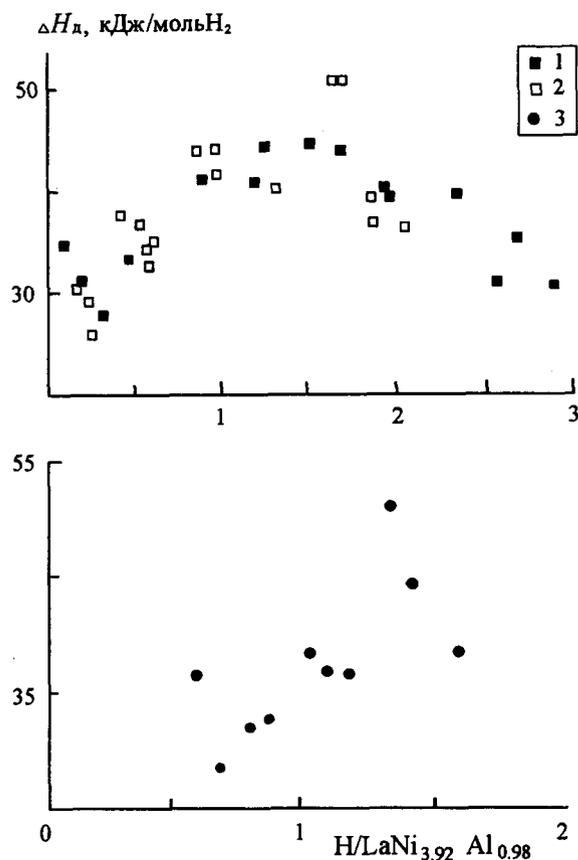


Рис. 4. Зависимость дифференциальной мольной энтальпии десорбции водорода от его содержания в $LaNi_{3,92}Al_{0,98}$ при T, K : 1 – 523, 2 – 566, 3 – 605

видно из рис. 4, при 523 К на границе области плато и β -раствора с ростом X наблюдается не “скачок” ΔH_d до ~ 50 кДж/моль H_2 в узкой области составов, а плавное уменьшение от ~ 42 до ~ 30 кДж/моль H_2 (при 566 К такой “скачок” имеет место).

Измерения, проведенные при 605 К, показали, что выделение водорода из образца происходит не полностью, остаточное содержание его в ИМС достигает 0,5. Возможно это связано со значительным увеличением времени установления равновесия в каждой экспериментальной точке при повышении температуры. Уменьшение скорости процесса десорбции водорода с ростом температуры для системы $LaNi_{3,85}Cu_{1,07} - H_2$ наблюдали и авторы работы [13]. Вероятно это явление можно объяснить образованием при этих температурах еще одного типа раствора водорода с ИМС, характеризующегося большей энтальпией образования. Как видно

из рис. 2, 4, на изотерме при 605 К можно выделить очень небольшую область, соответствующую $1,0 < X < 1,2$, в которой энтальпия имеет значение $37,9 \pm 0,6$ кДж/моль H_2 . Наличие такой узкой области свидетельствует о том, что температура 605 К по-видимому близка к критической, но точность определения граничных составов в проводимом эксперименте не позволяет приписать ей точное значение. В области α -раствора (как при температурах 523 и 566 К) значение энтальпии десорбции проходит через минимум в точке $X = 0,75$ (рис.4) и далее возрастает до указанной ранее величины. При $X > 1,2$ наблюдается характерный “скачок” значения энтальпии десорбции от 38 до ~ 52 кДж/моль H_2 при $X = 1,32$ с последующим понижением до ~ 35 кДж/моль H_2 при $X = 1,6$.

Как видно из таблицы, для составов, содержащих одинаковое количество водорода, имеет место заметное уменьшение величины $|\Delta H_{a(d)}|$ с повышением температуры. Для первого плато оно более значительно (от 49,2 кДж/моль H_2 при 319 К до 46,5 при 407 К), чем для второго. После трансформации плато в интервале температур 523 – 605 К тенденция к уменьшению величины энтальпии десорбции сохраняется и наблюдается ее изменение на довольно значительную величину от 42,3 до 37,9 кДж/моль H_2 . Полученные результаты еще раз подтверждают, что только калориметрическое изучение реакций водорода с ИМС позволяет точно определить значения энтальпий реакций в широком интервале температур.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №95-03-08787.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zijlstra H., Westendorf F.F. // Solid state Commun. 1969. 7. P. 1969.
2. Van Vucht J.H.N., Kuijpers F.A., Bruning H.C.A.M. // Philips Res. Repts. 1970. 25. P. 133.
3. Kuijpers F.A., Van Mal H.H. // J. Les.-Com. Met. 1971. 23. P. 395.
4. Kuijpers F.A. // J. Les.-Com. Met. 1972. 27. P. 27.
5. Сиротина P.A., Вербейский В.Н. // Неорган. Матер. 1994. 30. С. 197.
6. Hubbard W.N., Rawlins P.L., Connick P.A. R.A.G. // J. Chem. Thermodynamics. 1983. 15. P. 785.
7. Савченкова А.П., Сиротина P.A. и др. // Тепло- и массообмен при фазовых и химических превращениях. Минск, 1983. С. 98.
8. Takeshita T., Malik S.K., Wallance W.E. // J. Solid State Chem. 1978. N 1-2. P. 271.
9. Hemmes H., Driessen A., Griessen R. // J. Phys. C.: Solid State Phys. 1986. 19. P. 3517.
10. Семенов К.Н., Петрова Л.А., Бурнашева В.В. // ЖНХ. 1984. 29. С. 869.
11. Murray J.J., Post M.L., Taylor Y.B. // J. Les.-Com. Met. 1981. 80. P. 211.
12. Tanaka S., Clevly J.D., Flanagan T.B. // J. Catalysis. 1978. 51. P. 9.
13. Савченкова А.П., Семенов К.Н. // Изв. АН СССР. 1989. 25. С. 1313