

Главный редактор

М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ

Заместители главного редактора:

Н. А. ВЛАСОВ, Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. АЛИХАНОВ, А. А. БОЧВАР, А. П. ВИНОГРАДОВ, И. Н. ГОЛОВИН,
Н. А. ДОДЛЕЖАЛЬ, А. П. ЗЕФИРОВ, В. Ф. КАЛИНИН, А. К. КРАСИН,
А. Н. ЛЕЙБУНСКИЙ, В. В. МАТВЕЕВ, М. Г. МЕЩЕРЯКОВ, И. П. ПАЛЕЙ,
Д. Л. СИМОНЕНКО, В. И. СМЕРНОВ, В. С. ФУРСОВ, В. Б. ШЕВЧЕНКО.

СОДЕРЖАНИЕ

СТАТЬИ

И. П. Ларский, П. П. Корешков, П. И. Моисейев. Уровни внешнего облучения персонала при работах с различными источниками излучений 463

Г. Б. Усатин. Расчет состава топлива и характеристика быстрого энергетического реактора в установившемся режиме 466

В. И. Гришков, В. А. Афанасьев, Г. А. Сапковский, Р. А. Шугам, И. Н. Соколов, Ю. А. Соловьев. Исследование системы автоматического регулирования атомной энергетической установки с кипящим реактором 469

В. И. Павловский, Л. Л. Финштейн. К выводу уравнения динамики паросодержания в парогенерирующих каналах при кипении перегретой воды 474

Р. Г. Васильков, В. И. Гольдманский, Я. В. Еришманов, О. С. Лукиндин, Б. А. Нименов. Нейтронные выходы и потоки тепловых нейтронов в системе сшивки — вода, бомбардируемой протоками высоких энергий 479

А. П. Тугаринов, Г. Е. Ордынец, Р. И. Щенякова, Е. И. Крыськов. Об использовании палладий изотопного состава свинца при изменении уранового региона 483

В. С. Ермеев. Исследование динамики углерода на монокарбиде урана в молибдене и полибране 489

А. В. Давыдов, Е. С. Давышин, И. Н. Палей, Г. А. Прибылова. Соединения ионов Pa(V) в растворах галогенводородов 493

Ю. А. Сахаровский, Я. Д. Бельвенский. Экспериментальное определение значения коэффициента распределения при обменном обмене между жидким амальгамом и водородом 499

И. А. Копан, Л. И. Козаровицкая, И. М. Подгорный, В. А. Рязанов, В. П. Смирнов, А. М. Спектор, Д. А. Франк-Камецкий. Нагрев плазмы магнитно-звуковыми волнами 503

Г. В. Яковлевский, Ю. И. Серебряков. Развитие неустойчивости пучка электронов в магнитном ускорителе 507

АНОТЦИИ ДЕПОНИРОВАННЫХ СТАТЕЙ

Г. А. Сапковский, В. П. Гришков, Л. Л. Полтавцева, В. И. Плотинский. Методика исследования устойчивости водо-водяного кипящего реактора 514

В. Б. Дубровский, Ш. Ш. Ибрагимов, М. Я. Екин, А. Р. Тадыгин, Б. К. Пергаменцишвили. Стойкость серпентинитового б 515

Г. Я. Рязанов, В. С. Дмитриева, В. С. Фурсов. Взаимодействие быстрых нейтронов в среде с пустым телом 516

И. П. Иванов, Н. Ф. Прандок. Возможности использования молибдена и вольфрама для оценки относительного распределения изотопов быстрых нейтронов в реакторе 517

Л. Л. Бродер, С. А. Колосовский, в. С. Клыжуров, К. К. Попков, А. А. Сметанин. Прохождение быстрых нейтронов и γ -излучения через прямоуг 517

И. П. Зольников, К. А. Суханова, Б. Л. Двининин. Энергетическое и пространственное распределение обратно рассеянного γ -излучения 518

И. К. Карпенко. Полоидальные волны в минимум среднего магнитного поля в двухзачодном стеллараторе 518

И. К. Карпенко. Возможность существования магнитной ямы в комбинированном поле одного двухзачодного стелларатора 519

М. И. Авраменко, В. С. Кузнецов. К вопросу о расчете фазовой фокусировки иттенциальных ионных пучков 520

ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ

Э. А. Стумбур. О некоторых интегральных соотношениях в теории реакторов 522

О. А. Мизлер, А. М. Демидов, Ф. И. Овчинников, Л. И. Голубев, М. А. Сумчаганов. Гамма-спектры теплоносителя реактора первого блока Ново-Воронежской АЭС 524

Г. Г. Завени, И. А. Горак, Н. Т. Скаир, И. А. Тонант. Сечения радиационного захвата быстрых нейтронов изотопами Cu^{63} , Cu^{65} и W^{186} 526

С. Б. Ермагамбетов, Г. Н. Смиренин. Сечение деления Pu^{238} быстрыми нейтронами 527

А. Г. Доббенко, В. Е. Козесов, В. П. Королева, В. А. Толстиков, Ю. Н. Шубин. Сечения радиационного захвата нейтроном с энергией 0,2—3 Мэв ядрами Te^{128} и Te^{130} 529

Л. И. Прохорова, Г. Н. Смиренин, Ю. М. Турчин. Среднее число мгновенных нейтронов при спонтанном делении Pu^{242} 530

236052



РЕПОЗИТОРИЙ ИМЕНА Ф. СКОРИНЫ

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Guillaumont. Rev. chim. minerale, 3, 339 (1966).
2. R. Guillaumont, C. Miranda, Ibid., p. 861.
3. A. Casey, A. Maddock. J. Inorg. and Nucl. Chem., 10, 289 (1959).
4. Е. С. Пальшин, Б. Ф. Мясоедов, А. В. Давыдов. Аналитическая химия протактиния. М., «Наука», 1968, стр. 36.
5. A. Chetham-Strode, O. Keller. Physico-chimie du protactinium. Pub. No. 154. Centre nat. de la recherche scient. Paris, 1966, p. 189.
6. K. Kraus, G. Moore, F. Nelson. J. Amer. Chem. Soc., 78, 2692 (1956).
7. K. Kraus, G. Moore, J. Amer. Chem. Soc., 77, 1383 (1955).
8. P. Guillot. См. [5], p. 239.
9. Б. Я. Мясоедов, Е. С. Пальшин. «Ж. аналит. химии», 18, 596 (1963).
10. И. М. Гибало. Аналитическая химия ниобия и тантала. М. «Наука», 1967.
11. F. Nelson, T. Murase, K. Kraus. J. Chromatograph., 13, 503 (1964).
12. J. Vernois. J. Chromatograph., 2, 155 (1959).
13. H. Scherff, G. Hermann. Radiochim. acta, 6, 53 (1966).
14. J. Kanzelmeyer, J. Rayan, H. Fred. J. Amer. Chem. Soc., 78, 3020 (1956).

Экспериментальное определение величины коэффициента разделения при изотопном обмене между жидким аммиаком и водородом

Ю. А. САХАРОВСКИЙ, Я. Д. ЗЕЛЬВЕНСКИЙ

УДК 621.039.3

Реакция изотопного обмена между жидким аммиаком и водородом $(\text{NH}_3)_{\text{ж}} + \text{HD} \rightleftharpoons (\text{NH}_2\text{D})_{\text{ж}} + \text{H}_2$ представляет большой интерес для использования в промышленном производстве тяжелой воды по двухтемпературной схеме. Основные результаты экспериментальных исследований, опубликованные до 1964 г., приведены в обзоре [1]. В последние годы за рубежом эти работы продолжались на стадии полупромышленных испытаний [2, 3]. Во Франции в настоящее время строится завод по производству тяжелой воды, на котором в качестве рабочих веществ будут использованы жидкий аммиак и водород [4].

Одной из основных характеристик процесса разделения является коэффициент разделения α . При осуществлении процесса по двухтемпературной схеме решающее значение имеет зависимость α от температуры. Эта зависимость для рассматриваемой системы описывается уравнением [5]

$$\lg \alpha = \frac{237}{T} - 0,2428, \quad (1)$$

которое получено расчетным путем и лишь недавно проверено экспериментально [6]. Уравнение (1) выведено для области малых концентраций дейтерия и не учитывает наличия молекул, содержащих более одного атома дейтерия в аммиаке, число которых увеличивается с ростом общей концентрации тяжелого изотопа.

Цель настоящей работы — экспериментально изучить зависимость коэффициента разделения

от температуры и изотопной концентрации обменивающихся фаз. Измерения охватывали широкий интервал температур от -70 до $+100^\circ\text{C}$ и давлений от 0,5 до 150 атм.

Для определения коэффициента разделения применялся метод непосредственного измерения соответствующих равновесных фаз. Схема установки, на которой выполнены измерения, приведена на рис. 1. Опыты при повышенных давлениях (до 150 атм) проводились в стальном реакторе с падающей электромагнитной мешалкой (рис. 2). Частота падения мешалки задавалась с помощью реле времени и регистрировалась электромагнитным счетчиком. Опыты при давлении меньше атмосферного проводились в стеклянном реакторе с вращающейся магнитной мешалкой.

Для опытов использовали обогащенный дейтерием аммиак и водород природного изотопного состава. Аммиак предварительно осушали металлическим калием и дважды перегоняли. Водород очищали от азота и кислорода сорбцией на цеолите при температуре жидкого азота.

Чистоту газа контролировали путем сравнения теплопроводностей очищенного газа и газа, пропущенного через палладиевую мембрану. Чтобы ускорить установление равновесия, в аммиаке растворяли амид калия, являющийся катализатором реакции изотопного обмена. Выбиралось такое соотношение жидкой и газовой фаз, чтобы изменением изотопного состава жидкой фазы можно было пренебречь.

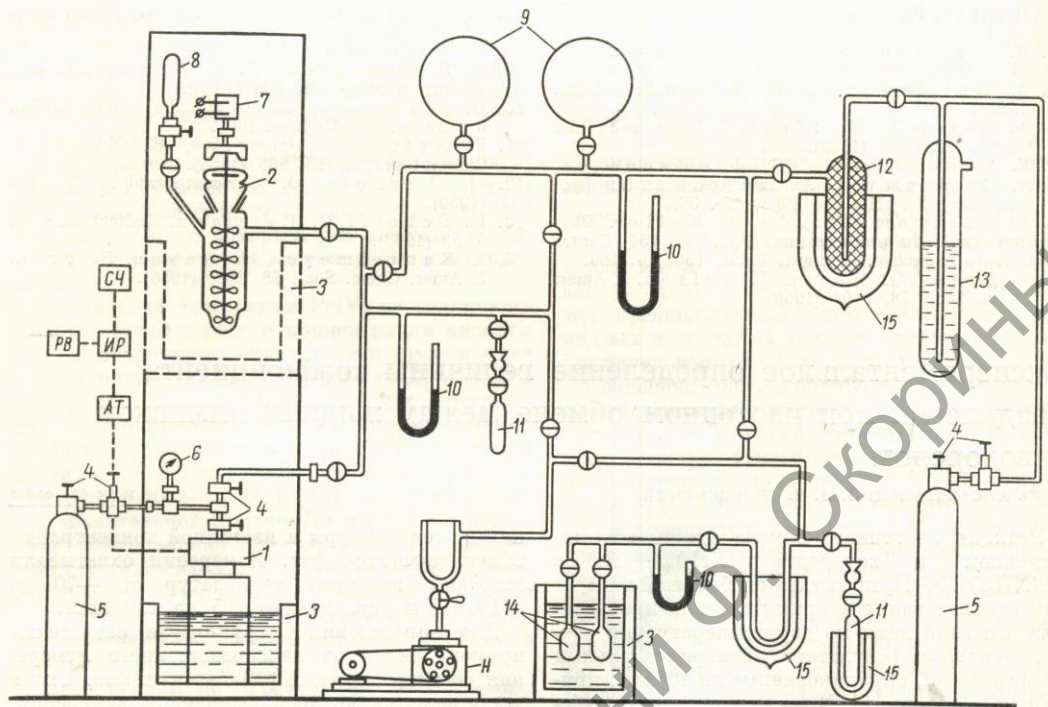


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — стальной реактор; 2 — стеклянный реактор; 3 — термостаты; 4 — вентили; 5 — баллоны для хранения очищенного водорода; 6 — образцовый манометр; 7 — электромотор; 8 — ампула с жидким аммиаком; 9 — емкости для хранения H_2 и D_2 ; 10 — ртутные манометры; 11 — ампулы для отбора проб; 12 — ловушка с цеолитом; 13 — маностат с глицерином; 14 — ячейки для измерения теплопроводности; 15 — сосуды Дьюара с жидким азотом; АТ — лабораторный автотрансформатор; ИР — исполнительное реле; РВ — реле времени; СЧ — электромагнитный счетчик; Н — вакуумный насос.

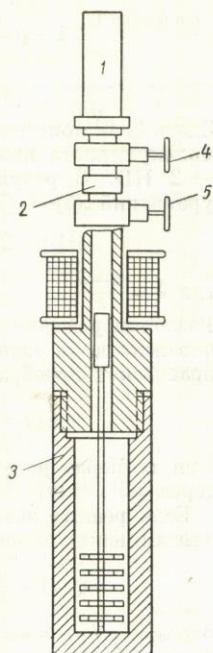
Изотопный анализ аммиака проводили дважды: перед началом и по окончании серии опытов. В первом случае часть аммиака, загруженного в обменный реактор, отгоняли и сжигали в печи с окисью меди. Полнота сжигания контролировалась реактивом Нesslerа. Собранный конденсат анализировали капельным методом. Во втором случае аммиак предварительно замораживали жидким азотом и реактор откачивали для удаления водорода, после чего аммиак сжигали и анализировали, как указано выше. Во всех проведенных опытах изотопный состав проб аммиака, отобранных на анализ до и после проведения серии опытов, совпадал в пределах ошибки анализа.

Изотопный состав водорода определяли по теплопроводности. Анализиремая проба освобождалась от аммиака вымораживанием в ловушках, охлаждаемых жидким азотом, направ-

лялась в сосуд с платиновым катализатором (на котором устанавливалось равновесие реакции изотопного обмена $H_2 + D_2 \rightleftharpoons 2HD$), затем поступала в ячейку объемом 3 см^3 для анализа. В качестве чувствительного элемента использовали платиновую проволоку диаметром 20 мк (сопротивление ячейки 300 ом). Содержание дейтерия определяли с помощью калибровочного графика, построенного для равновесной смеси ($H_2 + D_2 + HD$). Абсолютная погрешность отдельного измерения при определении содержания дейтерия составляла $\pm 0,1$ мол. %. Во всех опытах придерживались следующей методики измерения. Реактор откачивали до остаточного давления $5 \cdot 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ Затем соединяли его с предварительно взвешенной ампулой, содержащей раствор амида калия в аммиаке (концентрация раствора $0,8 + 1,5 \text{ моль/л}$), как показано на рис. 2, и переливали

Рис. 2. Реактор с падающей электромагнитной мешалкой и сборкой для загрузки жидкого аммиака:

1 — ампула с краном; 2 — отборный штуцер; 3 — реактор; 4 — запорный вентиль.



раствор амида, после чего ампулу вновь взвешивали. Реактор помещали в термостат и устанавливали заданную температуру. Затем напускали газ и измеряли его давление с помощью образцового манометра. Точность измерения $\pm 0,2$ атм. Убедившись в герметичности системы, включали мешалку и спустя некоторое время отбирали пробы газа на анализ.

В каждой серии опытов (серией мы называем несколько опытов, проведенных с одной и той же загрузкой аммиака и водорода) измерения начинали с некоторой промежуточной температуры. Затем температуру повышали до $+95^\circ\text{C}$ или понижали до -70°C через определенные ($15-20^\circ\text{C}$) интервалы. После достижения предельной температуры проводили повторные измерения, изменяя температуру в обратном порядке.

Таким образом, в каждой серии опытов коэффициент разделения определялся при заданной температуре два-три раза, при этом подход к равновесию осуществлялся с двух сторон: со стороны жидкости при нагревании и со стороны газа при охлаждении.

Результаты опытов и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты определений коэффициента разделения. Значения изотопных концентраций в газовой фазе y являются средними величинами, полученными в нескольких повторных опытах данной серии.

Измерения проведены при общем давлении в системе от 25 до 90 атм. В специальной серии опытов было показано, что величина α при изменении давления от 1 до 100 атм при постоянной температуре остается постоянной в пределах точности измерений.

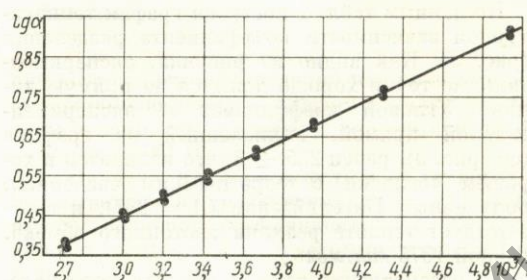


Рис. 3. Зависимость коэффициента разделения от температуры.

Величину коэффициента разделения рассчитывали по уравнению

$$\alpha = \frac{x}{y} \cdot \frac{1-y}{1-x} \quad (2)$$

где x и y — равновесные концентрации дейтерия соответственно в аммиаке и водороде. Для сравнения в последнем столбце табл. 1 указаны значения коэффициента разделения, вычисленные по уравнению Бигеляйзена [см. (1)].

Значения коэффициентов разделения при различных температурах и концентрациях дейтерия Таблица 1

$T, ^\circ\text{C}$	x	y	α	α_0
-70	0,335	0,060	$7,91 \pm 0,16$	8,35
	0,488	0,108	$7,88 \pm 0,11$	
-40	0,335	0,081	$5,74 \pm 0,07$	5,92
	0,488	0,143	$5,72 \pm 0,07$	
-20	0,335	0,095	$4,80 \pm 0,05$	4,95
	0,488	0,169	$4,68 \pm 0,04$	
0	0,335	0,109	$4,12 \pm 0,04$	4,22
	0,488	0,191	$4,03 \pm 0,03$	
+20	0,335	0,126	$3,50 \pm 0,03$	3,68
	0,488	0,219	$3,41 \pm 0,03$	
	0,514	0,238	$3,40 \pm 0,03$	
	0,700	0,410	$3,36 \pm 0,02$	
+40	0,335	0,137	$3,17 \pm 0,03$	3,27
	0,488	0,237	$3,06 \pm 0,02$	
	0,700	0,435	$3,02 \pm 0,02$	
+60	0,335	0,150	$2,85 \pm 0,03$	2,96
	0,488	0,258	$2,75 \pm 0,03$	
+95	0,335	0,174	$2,40 \pm 0,03$	2,53
	0,488	0,288	$2,36 \pm 0,03$	

По данным табл. 1 построен график температурной зависимости коэффициента разделения (рис. 3). Как видно из рисунка, экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую линию. Угловой коэффициент A экспериментальной прямой, вычисленный из графика (см. рис. 3), равен 235 ± 3 , что находится в хорошем согласии с теоретическим значением, полученным Бигеляйзенем ($A = 237$), и соответствует теплоте реакции изотопного обмена, равной 1075 кал/моль .

Из рассмотрения табл. 1 следует, что экспериментальные значения α на 5—10% ниже значений, рассчитанных по уравнению Бигеляйзена, причем величина этого расхождения растет с повышением концентрации дейтерия (экспериментальные значения α уменьшаются с ростом концентраций дейтерия).

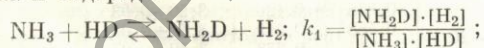
Наблюдаемая зависимость коэффициента разделения от концентрации дейтерия связана с отклонением соотношения различных изотопно замещенных форм молекул аммиака и водорода от равновероятного распределения и может быть учтена следующим образом. Принимая во внимание все возможные изотопные формы молекул, запишем коэффициент разделения рассматриваемой системы в общем виде:

$$\alpha = \frac{x}{1-x} \cdot \frac{1-y}{y} = \frac{\frac{1}{3}[\text{NH}_2\text{D}] + \frac{2}{3}[\text{NHD}_2]}{[\text{NH}_3] + \frac{2}{3}[\text{NH}_2\text{D}]} + \frac{\frac{1}{3}[\text{ND}_3]}{\frac{1}{3}[\text{NHD}_2]} \cdot \frac{\frac{1}{2}(\text{HD}) + [\text{H}_2]}{\frac{1}{2}(\text{HD}) + [\text{D}_2]} \quad (3)$$

Уравнение (3) легко привести к более простому виду:

$$\alpha = \frac{2}{3} k_1 \psi(x) \varphi(y) \quad (4)$$

Здесь k_1 — константа равновесия реакции изотопного обмена монозамещенных молекул аммиака и водорода:



$\psi(x)$ и $\varphi(y)$ — функции, учитывающие отклонение от равновероятного распределения изотопов соответственно в аммиаке и водороде.

Чтобы учесть влияние отклонения от равновесного распределения в водороде, решим следующую систему уравнений, воспользовавшись предложенным ранее методом [7]:

$$y = [\text{D}_2] + \frac{1}{2}[\text{HD}]; \quad (5)$$

$$1 - y = [\text{H}_2] + \frac{1}{2}[\text{HD}]; \quad (6)$$

$$k_0 = \frac{[\text{HD}]^2}{[\text{H}_2] \cdot [\text{D}_2]}. \quad (7)$$

Здесь k_0 — константа равновесия реакции гомолекулярного изотопного обмена $\text{H}_2 + \text{D}_2 \rightleftharpoons 2 \text{HD}$. В результате совместного решения уравнений (5) — (7) получаем

$$[\text{HD}] = 2y(1-y) - \frac{[\text{HD}]^2}{2} \delta, \quad (8)$$

$$\text{где } \delta = \frac{4-k_0}{k_0}.$$

Разложив решение уравнения (8) в ряд и ограничиваясь двумя членами разложения, после алгебраических преобразований получим

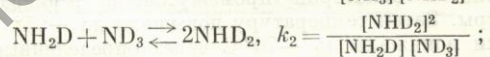
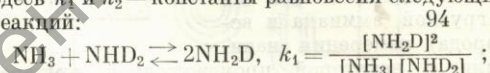
$$\varphi(y) = 1 - \frac{\delta y}{1 + \delta y^2}. \quad (9)$$

При температуре $+20^\circ \text{C}$ и концентрации дейтерия 50% $\varphi(y) = 0,89$.

Если решить аналогичную систему уравнений для аммиака, то нетрудно показать, что

$$\psi(x) = \frac{3}{k_2} \cdot \frac{b^2 k_2 + 2b k_2 + 3}{b^2 3 + 2b k_1 + k_1}. \quad (10)$$

Здесь k_1 и k_2 — константы равновесия следующих реакций:



$$b = \frac{[\text{NH}_2\text{D}]}{[\text{NHD}_2]} = \frac{1-x}{x} \cdot \frac{k_1}{k_2} \left(1 - \frac{k_1 - k_2}{k_1 - 2} \right);$$

в последнем выражении x — концентрация дейтерия в аммиаке. Подставив в (10) значения k_1 и k_2 , равные соответственно 2,94 и 2,90 [8] при температуре $+25^\circ \text{C}$, и приняв концентрацию дейтерия в аммиаке равной 50%, найдем значение $\psi(x) = 1,01$. Величина $\psi(x)$ слабо зависит от температуры и концентрации и в дальнейшем с достаточной степенью точности может быть принята равной 1.

Подставив (9) в (4), получим уравнение, учитывающее зависимость α от концентрации

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{\delta y}{1 + \delta y^2} \right), \quad (11)$$

где $\alpha_0 = \frac{2}{3} k_1$ — значение коэффициента разделения, полученное Бигеляйзенем для области малых концентраций. Когда y мало, $\alpha = \alpha_0$. В табл. 2 приведены значения коэффициента разделения, рассчитанные по уравнению (11). Там же для сравнения приведены экспериментальные значения α . Как видно из таблицы,

Сравнение экспериментальных и рассчитанных по уравнению (11) значений коэффициентов разделения Таблица 2

T, °C	ν	α (эксперимент)	α (по уравнению (11))	δ *
-70	0,060	7,91±0,16	8,15	0,385
	0,108	7,83±0,11	7,98	
-40	0,081	5,74±0,07	5,75	0,316
	0,143	5,72±0,07	5,65	
-20	0,095	4,80±0,05	4,81	0,282
	0,169	4,68±0,04	4,71	
0	0,109	4,12±0,04	4,10	0,262
	0,191	4,03±0,03	4,01	
+20	0,126	3,50±0,03	3,57	0,231
	0,219	3,41±0,03	3,48	
	0,238	3,40±0,03	3,47	
	0,410	3,36±0,02	3,33	
+40	0,137	3,17±0,03	3,18	0,208
	0,237	3,06±0,02	3,10	
	0,435	3,02±0,02	2,97	
+60	0,150	2,85±0,03	2,87	0,190
	0,258	2,75±0,03	2,81	
+95	0,174	2,40±0,03	2,44	0,175
	0,288	2,36±0,03	2,40	

* При расчете величины δ были использованы значения констант равновесия k_0 , приведенные в работе [8].

расчетные и экспериментальные величины достаточно хорошо совпадают. Следовательно, уравнение (11) можно рекомендовать для вычисления коэффициентов разделения в широкой области концентраций дейтерия.

Нагрев плазмы магнитно-звуковыми волнами

И. А. КОВАН, Л. Л. КОЗОРОВИЦКИЙ, И. М. ПОДГОРНЫЙ, В. Д. РУСАНОВ,
В. П. СМЕРНОВ, А. М. СПЕКТОР, Д. А. ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ

УДК 533.9

Нагревание ионов при магнитно-звуковом резонансе. Вынужденные радиальные колебания однородного плазменного цилиндра в постоянном магнитном поле имеют резонансный характер, если собственная частота плазменного цилиндра совпадает с частотой внешнего продольного переменного поля. Это явление, получившее название магнитно-звукового резонанса, было теоретически предсказано [1], а затем в 1960 г. обнаружено и исследовано экспериментально [2]. Резонансное увеличение амплитуды переменного магнитного поля в плазме

Выводы

1. Проведено экспериментальное определение коэффициента разделения изотопов водорода при обмене между водородом и жидким аммиаком в широком температурном интервале от -70 до +95° С.

2. Найдено, что зависимость $\lg \alpha = A/T + B$, причем величина коэффициента $A = 235$, что хорошо согласуется с расчетными данными Бигеляйзена.

3. Экспериментально установлено, что коэффициент разделения существенно зависит от концентрации дейтерия. Предложено уравнение, удовлетворительно описывающее зависимость α от концентрации.

4. В области малых концентраций дейтерия для определения можно использовать данные Бигеляйзена.

Поступила в редакцию 18/X 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

- С. Е. Казинина, Б. А. Трубицын, И. М. Гельперин. «Химическая промышленность», № 41, 861 (1965).
- Chem. Eng. Techn., 37, 1185 (1965).
- V. Desfrancois. Доклад 28/P/91, представленный Францией на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
- Nucl. Engng, 9, 405 (1965).
- M. Perlman, J. Bigeleisen. J. chim. phys. et phys.-chim. biol., 21, 70 (1953).
- G. Dirian, J. Ravoit. J. Chem. phys., 60, 130 (1963).
- А. М. Розен. Теория разделения изотопов в колоннах. М., Атомиздат, 1958.
- И. Киршенбаум. Тяжелая вода. М., Изд-во иностр. лит., 1953.

по сравнению с амплитудой поля в вакууме (эффект пространственного усиления переменного поля) описано в работах [3, 4].

В настоящей работе рассмотрены возможности использования магнитно-звукового резонанса для нагревания ионной компоненты плазмы [5]. Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Цилиндрическая вакуумная камера, изготовленная из стекла, размещалась коаксиально с соленоидом, создающим постоянное магнитное поле напряженностью 2 кэ. Колебания в плазме воз-