

УДК: УДК 541.141.5+546.027

UDC УДК 541.141.5+546.027

01.00.00 Физико-математические науки

Physics and Mathematics

**КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОЕ
ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ АМАЛЬГАМНОГО
МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ**

**THE QUANTUM AND MECHANICAL
JUSTIFICATION OF INTENSIFICATION BY
MAGNETIC FIELD OF AMALGAM ISOTOPE
SEPARATION METHOD**

Мышкин Вячеслав Федорович
д.ф.-м.н., доцент
*Томский национальный исследовательский
политехнический университет, Томск, Россия*

Mishkin Viacheslav Fedorovich
Dr.Sci.Phys.-Math., professor
*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia*

Хан Валерий Алексеевич
д.т.н., профессор
*Томский национальный исследовательский
политехнический университет, Институт оптики
атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

Khan Valery Alekseevich
Dr.Sci.Tech., professor
*National Research Tomsk Polytechnic University,
Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia*

Задорожный Валерий Николаевич
к.ф.-м.н., доцент

Zadorozhnyy Valeriy Nikolaevich
Candidate of Physics and mathematical science

Семченко Игорь Сергеевич
бакалавр

Semchenko Igor Sergeevich
bachelor

Ленский Владимир Николаевич
старший преподаватель
*Томский национальный исследовательский
политехнический университет, Томск, Россия*

Lenskiy Vladimir Nikolaevich
senior lecturer
*National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia*

Неуклонное увеличение потребности в изотопах требует разработки методов повышения эффективности технологий разделения изотопов. Методы разделения изотопов на основе термодинамических различий изотопных форм молекул не требуют значительных капиталовложений, но характеризуются малой скоростью обмена. Известно, что магнитное воздействие приводит к изменению колебательных частот молекул, а поэтому их термодинамических параметров. Последнее увеличивает, в том числе, скорость обмена. Приводятся результаты экспериментального определения теплового эффекта растворения солей NaCl, KCl, CuSO₄, разложения амальгамы натрия дистиллятом в магнитном поле и без поля. Путем квантово-механического анализа полученных результатов показано, что магнитное воздействие может оказать значительное влияние на амальгамно-обменный метод

The steady increase in demand for isotopes requires the development of methods to increase the efficiency of isotope separation technologies. Methods of isotope separation based on thermodynamic differences of isotopic forms of the molecules don't require significant investment, but characterized by a low rate of exchange. It's known that the magnetic effect leads to a change the vibrational frequency of the molecules, and therefore their thermodynamic parameters. The change increases the thermodynamic parameters, including the exchange rate. The results of the experimental determination of the thermal effect of dissolving the salts of NaCl, KCl, CuSO₄, sodium amalgam decomposition by distillate in a magnetic field and without field were shown. Magnetic interference can have a significant effect on the amalgam exchange method which was shown by quantum and mechanical analysis of the results

Ключевые слова: ИЗОТОПЫ, ИЗОТОПНЫЙ ОБМЕН, СПИН, ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА, ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ, ТЕРМОДИНАМИКА, МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА, АМАЛЬГАМА, ТЕМПЕРАТУРА

Keywords: ISOTOPES, ISOTOPIC EXCHANGE, SPIN, ZEEMAN EFFECT, OSCILLATION FREQUENCY, THERMODYNAMICS, MAGNETIC FIELD, QUANTUM MECHANICS, AMALGAM, TEMPERATURE

Введение

В настоящее время разработаны множество методов разделения с использованием практически всех изотопных эффектов. Из-за малой эффективности процесса разделения изотопные материалы имеют значительную стоимость. Неуклонное увеличение потребности в изотопах требует разработки энергоэффективных технологий разделения стабильных и радиоактивных изотопов.

Изотопы одного элемента отличаются спином и массой ядра. Различие изотопов по массам широко используется при промышленном разделении изотопов различных элементов. Различие в спинах ядер используется в магнитном изотопном эффекте – сепарации спиновых и бесспиновых ядер в жидкофазных радикальных химических реакциях, протекающих в постоянном магнитном поле [1]. Известно также, что магнитное поле спиновых ядер изотопов ^{25}Mg , ^{57}Fe , ^{67}Zn оказывает влияние на скорость биохимических процессов. При столкновении неорганического иона с парамагнитным ядром и белковой молекулы возможно появление радикальной пары, что сопровождается увеличением в 2-4 раза скорости биохимической реакции [2].

Для увеличения эффективности методов разделения изотопов является перспективной разработкой физических методов воздействия, например, магнитного поля. Напомним, что без магнитного поля спин ядра (неспаренного электрона) ориентирован в пространстве хаотично. Во внешнем магнитном поле наблюдается прецессия спина как валентного электрона, так и ядра относительно направления поля [3].

Цель исследования: получение экспериментальных данных для обоснования возможности магнитной интенсификации реакции изотопного обмена в системе амальгама - щелочь.

Термодинамические эффекты в процессах разделения изотопов

Методы разделения изотопов можно объединить в две группы: кинетические и термодинамические. Кинетические методы эффективны при быстром разделении фаз, содержащих целевой и отвальный изотопы. При длительном контакте соединений исходного и конечного изотопного состава основной вклад вносят термодинамические эффекты, лежащие в основе метода сепарации изотопов в реакции изотопного обмена.

Метод сепарации изотопов легких элементов в процессах химического изотопного обмена, основанный на использовании термодинамически обратимых явлений в двухфазных системах, предложен в тридцатых годах 20 века [4]. В общем виде уравнение реакции изотопного обмена может быть записано как:



где индекс «*» - соответствует тяжелому изотопу.

Термодинамические параметры молекул зависят от их электронного строения [5]. Поэтому при анализе процесса изотопного обмена можно использовать методы статистической термодинамики. Для этого проводят анализ статистических сумм, характеризующих две взаимодействующие системы. Общая статистическая сумма системы может быть выражена через статистические суммы отдельных молекул [6]:

$$Q = \sum_n g_n e^{\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_n}{kT}} = e^{-\varepsilon_0 / kT} \sum_n g_n e^{-\varepsilon_n / kT} = q e^{-\varepsilon_0 / kT}, \quad (2)$$

где $q = \sum_n g_n e^{-\varepsilon_n / kT}$ - статистическая сумма; ε_n - энергия n -го уровня, отсчитываемого от низшего уровня с энергией ε_0 ; g_n - кратность вырождения n -го уровня.

В работе [7] показано, что для простых молекул статистическую сумму можно представить в виде произведения множителей, зависящих от электронного строения отдельной молекулы и обусловленных взаимодействием молекул друг с другом.

На основе значений отношений статистических сумм по состоянию изотопных форм многоатомных молекул в работе [8] показано, что для элементов с массой менее 100 метод химического обмена при промышленном разделении изотопов экономичнее, чем газовая диффузия. Метод химического изотопного обмена имеет высокую эффективность для разделения стабильных изотопов С, В, N и S [9].

В работе [10] приведен анализ методов, как приближенного, так и точного вычисления отношений сумм по состояниям многоатомных молекул, содержащих разные изотопы. Обсуждаются закономерности, связывающие величины изотопных эффектов со структурными и общехимическими характеристиками молекул.

Количественной характеристикой методов сепарации изотопов является однократный коэффициент разделения α , который в случае изотопного обмена может быть выражен через β -факторы контактирующих соединений:

$$\alpha_{A-B} = \beta_{BX} : \beta_{AX} . \quad (3)$$

Оценка возможностей метода изотопного обмена по значениям β -факторов использовалась во многих работах [11]. Подробный анализ методов вычисления β -факторов, для замещенных по изотопам многоатомных молекул, приведен в обзоре [10]. В работах [12, 13] как проанализированы изотопные эффекты при замещении изотопов Н – D и Н – Т, так и вычислены константы равновесия реакций изотопного обмена с участием изотопов D и Т для замещения водорода в молекулах H_2 ; H_2O ; H_2S ; H_2Se и NH_3 при различных температурах.

Известны множество формул для вычисления величины β -фактора. Широко используется формула для расчёта, в гармоническом приближении, логарифма β -фактора [4, 14]:

$$\ln \beta = \frac{1}{n} \sum_i^n d_i \ln \left\{ \frac{u'_i \exp(-0,5u'_i)}{u_i \exp(-0,5u_i)} \cdot \frac{1 - \exp(-0,5u'_i)}{1 - \exp(-0,5u_i)} \right\}, \quad (4)$$

где $u_i = \nu_i hc/kT$ - приведенная частота колебания ν_i , см^{-1} , d_i - кратность вырождения Зеемановских уровней.

В (4) используется логарифм β -фактора, так как он пропорционален разности свободных энергий замещенных по изотопам молекул.

Причиной изотопных эффектов во многих процессах, является отличие в массах ядер. В связи с этим было получено выражение для расчета β -фактора в явном виде, в рамках термодинамической теории возмущений, через разность массы двух изотопов [15]:

$$\ln \beta = \left(\frac{K}{zRT} - \frac{3}{2} \right) \frac{\Delta m}{m^*}, \quad (5)$$

где K - кинетическая энергия колебаний одного моля замещаемого по изотопу атома, z - кратность изотопной замены, $\Delta m = m^* - m$.

Термодинамические эффекты во внешнем магнитном поле

Известен магнитокалорический эффект - изменение температуры магнетика в результате обратимого выделения (поглощения) тепла веществом в адиабатических условиях в постоянном магнитном поле [16]. Интерес к этому явлению сохраняется до настоящего времени [17, 18].

Напомним, что процессы термодинамического изотопного обмена базируются на разности внутренней энергии двух фаз, содержащих разные изотопы. В магнитном поле расщепляются вырожденные уровни энергии электрона. При этом отношение внутренних энергий двух фаз изменяется. Это изменение, из-за экспоненциального распределения электронов по энергетическим уровням, может быть весомым. Очевидно, что изотопы, имеющие разный спин ядра, имеют разное изменение внутренней энергии, связанного с β -фактором, из-за сверхтонкого взаимодействия электронной

и ядерной систем.

Во внешнем магнитном поле в результате эффекта Зеемана также происходит расщепление уровней энергии колебательного спектра молекулы (вещества). На рис. 1 приведены графики зависимости частот трех зеемановских компонентов линии с $\Delta M = +1$ перехода $Q(2.5)$ молекулы NO в состоянии $^2P_{3/2}$, по сравнению с длиной волны излучения CO-лазера на переходе $9 \rightarrow 8 P(15)$, во внешнем магнитном поле [19].

Экспериментальные исследования теплового эффекта физико-химических процессов в магнитном поле

В работе [20] на примере амальгамы лития теоретически была показана возможность влияния магнитного поля на величину β -фактора. По данным этой работы магнитное поле 1,1 Тл может вызывать изменение однократного коэффициента разделения α амальгамно-обменного метода на $\Delta\alpha = \pm 0,001$.

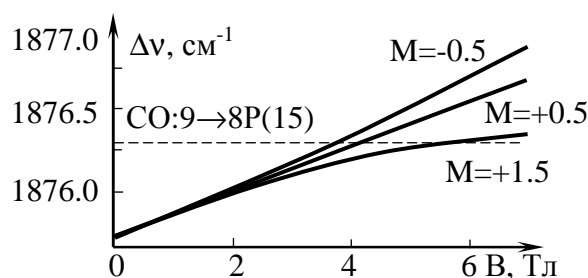


Рис. 1. Зависимость частоты линий ИК-спектра NO в магнитном поле.

Для экспериментального изучения влияния внешнего постоянного магнитного поля на тепловой эффект при взаимодействии солей NaCl, KCl, CuSO₄ и амальгамы натрия с дистиллятом была собрана теплоизолированная ячейка, схема которой изображена на рис. 2.

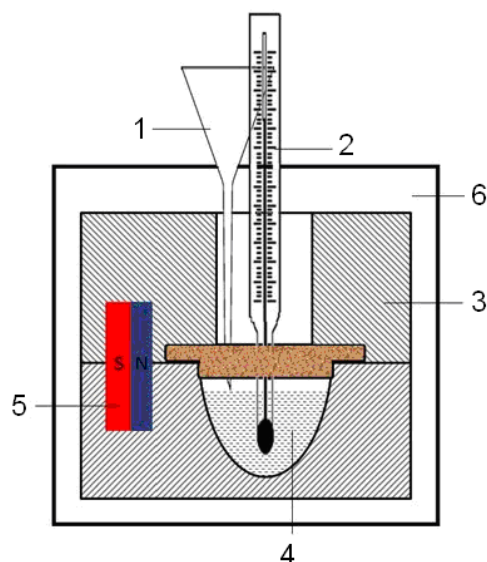


Рис. 2. Схема экспериментальной ячейки. 1 – дозатор; 2 – термометр Бекмана; 3 – теплоизолятор; 4 – стакан; 5 – магнит (0,2; 1,2 Тл); 6 – магнитный экран.

Основу ячейки составлял теплоизоляционный экран из пенопласта, выполненный из двух половинок: корпус и крышка. В корпусе предусмотрены ячейки для размещения постоянных магнитов и тонкостенного полиэтиленового стакана. Стакан предназначен для смешивания двух компонентов. Крышка и корпус, для предотвращения паразитных потерь тепла, имеют лабиринтное сочленение. В крышке предусмотрены два цилиндрических сквозных отверстия. В первое отверстие плотно устанавливается термометр Бекмана, а во второе – трубочка дозатора реагентов. Корпус размещен дополнительно в стальном боксе так, чтобы шкала термометра и дозатор находились снаружи. Поэтому смешивание компонентов и контроль температуры происходят в условиях теплоизоляции и без воздействия магнитного поля Земли. С каждым соединением проводили не менее 8 измерений при фиксированной температуре окружающей среды.

Выбор солей связан со значениями ядерных спинов. Например, ядра всех изотопов в солях NaCl, KCl имеют спин 3/2. Соединение CuSO₄

содержит более 99,6% безспиновых изотопов ^{16}O и ^{18}O , изотопы меди имеют спин $3/2$, изотоп серы ^{32}S (95% в природной смеси) не имеет ядерного спина. Поэтому следует ожидать разную реакцию на магнитное поле: с одной стороны NaCl и KCl , с другой стороны - CuSO_4 . Амальгама натрия взята как более доступная, чем амальгама лития. При этом 93,3% ядер лития имеют такой же спин ядра, как натрий. Поэтому квантово-механические закономерности для амальгам натрия и лития в постоянном магнитном поле должны быть схожими.

Для определения *теплового эффекта при растворении солей* NaCl , KCl , CuSO_4 использовали предварительно выдержанные в сушильном шкафу соли. Полиэтиленовые стаканы заменялись перед каждым измерением. Стаканы устанавливались в ячейку, заливались дистиллятом. Количество дистиллята отмеряли с помощью мерного стакана с точностью ± 1 мл. Количество соли отмерялось с помощью электронных весов с точностью $\pm 0,05$ граммов. При измерениях использовали 90 мл дистиллята, а количество солей – 3,4 грамма. Подготовка теплоизолированной ячейки к проведению измерения заключается в заливке дистиллята и установлении теплового равновесия дистиллята в ячейке с окружающей средой. Перед началом измерений регистрировали температуру воздуха в лаборатории. Далее в стакан теплоизолированной ячейки, наполненной дистиллятом, засыпали одну из солей. Для выполнения измерений с магнитным полем перед заливкой дистиллята в ячейку устанавливали постоянный магнит. Показания термометра регистрировали через каждые 5 минут. При этом необходимо учитывать инерционность термометра Бекмана и наличие теплоемкости ячейки – за время достижения максимального показания термометра часть тепла успевает перейти в ячейку. Поэтому показания термометра всегда отличаются от истинного изменения температуры.

Экспериментальные данные изменения температуры при растворении NaCl в дистилляте показывают, что тепловой эффект не зависит от наличия внешнего магнитного поля (0,2 или 1,1 Тл). При этом регистрируемое изменение температуры раствора зависит от температуры окружающей среды. Измерения в магнитном поле 0,2 Тл и без поля проводили при температуре $16\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (наблюдается охлаждение на $0,28\pm 0,005^{\circ}\text{C}$), а в поле 1,1 Тл и контрольные – при $17\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (охлаждение на $0,45\pm 0,005^{\circ}\text{C}$).

Экспериментальные данные изменения температуры при растворении KCl в дистилляте показывают, что на тепловой эффект влияет магнитное поле 0,2 Тл. Охлаждение температуры при растворении в поле 0,2 Тл составляет $0,82\pm 0,005^{\circ}\text{C}$, без поля - $0,90\pm 0,005^{\circ}\text{C}$ (при температуре среды $16\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). При температуре среды $17\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ без магнитного поля раствор охлаждался на $1,13\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. При температуре среды $17\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ в магнитном поле 0,2 Тл растворение KCl в дистилляте сопровождается охлаждением раствора на $1,03\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а в поле 1,1 Тл раствор охлаждался на $1,13\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Охлаждение на $1,13\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ наблюдалось также при растворении без поля.

Экспериментальные данные изменения температуры при растворении CuSO_4 в дистилляте показывают, что при температуре среды $17\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ магнитное поле 1,1 Тл незначительно влияет на тепловой эффект: охлаждение раствора без поля составляет $0,14\pm 0,005^{\circ}\text{C}$, а в магнитном поле - $0,16\pm 0,005^{\circ}\text{C}$.

Данные по регистрации изменения температуры при растворении солей NaCl, KCl, CuSO_4 в дистилляте позволяют предположить схожий характер изменения термодинамических свойств этих солей и воды при одновременном действии на них постоянным магнитным полем.

Тепловой эффект разложения амальгамы с помощью дистиллята может быть связан не только с изменением внутренней энергии системы в начале процесса и по его окончанию, но и с выделением водорода.

Выделение водорода вносит некоторую систематическую ошибку при измерении температуры. Анализ показывает, что изменение теплового эффекта незначительно в связи с действием магнитного поля на процесс выделения водорода. Для проведения эксперимента была приготовлена амальгама натрия, которая использовалась при всех измерениях. Для измерений использовали 40 граммов амальгамы и 90 мл дистиллята.

Для выполнения измерений в стакан ячейки помещали навеску амальгамы и ждали выравнивания температуры. Далее в стакан заливали дистиллят. Измерения проводили с магнитом (0,2 Тл) и без магнита при температуре окружающего воздуха $19\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Без магнитного поля разложение амальгамы натрия дистиллятом сопровождается повышением температуры на $0,19\pm 0,005^{\circ}\text{C}$. В магнитном поле 0,2 Тл наблюдается охлаждение на $0,45\pm 0,005^{\circ}\text{C}$. Очевидно, что магнитное поле оказывает значительное воздействие как на процесс разложения амальгамы, так и на величины термодинамических параметров исходного и конечного соединений, относительно параметров воды. При этом, очевидно, столь же кардинально должны изменяться бета-факторы. Эти данные подтверждают возможность увеличения эффективности амальгамно-обменного метода разделения изотопов с помощью внешнего постоянного магнитного поля.

Широко известен эффект магнитострикции – изменение объема тела в магнитном поле. Ртуть термометра может изменить свой объем в магнитном поле, что наблюдателем будет регистрироваться как изменение температуры. Также известен магнитокалорический эффект. Установлено, что изменение показаний термометра Бекмана, при внесении или удалении его из магнитного поля 1,1 Тл, не превышает $0,01\pm 0,005^{\circ}\text{C}$. Поэтому указанные эффекты можно не учитывать.

В квантовой механике различают «слабое» магнитное поле, когда энергия спин-орбитальной связи сильнее энергии магнитного воздействия. В «сильном» поле магнитное воздействие разрывает спин-орбитальную

связь. Очевидно, что для каждого соединения граница между «слабым» и «сильным» магнитными полями индивидуальна. В магнитном поле, за счет изменения колебательных частот из-за смещения электронных уровней в результате эффекта Зеемана, изменяется величина бета-фактора (смотри формулу (4)). При этом изменения термодинамических свойств могут быть разными в области «слабого» и «сильного» магнитного поля. При этом важно относительное изменение колебательных частот двух контактирующих веществ. Очевидно, что изменение термодинамических свойств неорганических солей NaCl, KCl, CuSO₄ в магнитном поле (0,2 Тл, 1,1 Тл) относительно дистиллята незначительно. Напротив, в паре амальгама натрия – дистиллят относительное изменение термодинамических свойств в магнитном поле 0,2 Тл более значительно. Поэтому можно ожидать увеличения эффективности амальгамного метода разделения изотопов с помощью внешнего постоянного магнитного поля.

ВЫВОДЫ

1. Тепловой эффект при растворении неорганических солей NaCl, KCl, CuSO₄ в дистилляте значительной мере зависят от температуры и незначительно от воздействия магнитными полями 0,2 Тл и 1,1 Тл.
2. При разложении амальгамы натрия дистиллятом нагрев раствора на $0,19 \pm 0,005^\circ\text{C}$ без поля в магнитном поле 0,2 Тл изменяется на охлаждение на величину $0,45 \pm 0,005^\circ\text{C}$, что показывает на возможность увеличения эффективности амальгамно-обменного метода с помощью магнитного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях / Под ред. Ю.Н. Молина. – Новосибирск: Наука, 1978. - 296 с.

2. Бучаченко А.Л., Кузнецов Д.А. Магнитный изотопный эффект магния - ключ к механохимии фосфорилирующих ферментов как молекулярных машин // Молекулярная биология, 2006. – Т.40. - №1. – С. 12-19.
3. Hans E. Lundager Madsen Theory of electrolyte crystallization in magnetic field // Journal of Crystal Growth, 2007. - V. 305, Issue 1. - P. 271-277.
4. Urey H.C., Greiff L.I. Isotope exchange equilibria // J. Chem. Phys., 1935. - V. 3. - P. 321-327.
5. Николаев А.В., Яковлев И.И. Клатратообразование и физико-химический анализ экстракционных систем, Новосибирск: Наука, 1975. -190 с.
6. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. -М.: Наука, 1977. - 552 с.
7. Мазалов Л.Н. Электронно-структурные факторы в экстракции // Журнал структурной химии, 2003. – Т.44. №1. – С. 7-38.
8. Даулетбай А.Д., Мырзалиева С.К. О возможности разделения изотопов средних и тяжелых элементов методом химического обмена // Пищевая технология и сервис, 2010. - №3. – С.93-97.
9. Semiokhin L.A. Chemical Methods of Stable Isotope Separation // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 1996. - V. 205, N 2. P. 201-213.
10. Жаворонков Н.М., Князев Д.А., Ивлев А.А., Клинский Г.Д. Термодинамика реакций изотопного обмена // Успехи химии, 1980. - Т. 49. - Вып. 3. - С.384-419.
11. Knyazev D.A, Bochkaev A.V, Myasoedov N.F // Separation Science and Technology, 2001. – V.36. – P. 1595-1675.
12. Князев Д.А., Мясоедов Н.Ф., Бочкарев А.В. Теория равновесных изотопных эффектов водорода // Успехи химии, 1992. – V.61. N 2. - 384-414.
13. Bron J., Chang C.F., Wolfsberg M. Isotopic partition function ratios involving H₂, H₂O, H₂S, H₂Se and NH₃ // Z. Naturforsch, 1973. - V. 28a. - P. 129–136.
14. Bigeleisen J., Mayer M.G. Calculation of Equilibrium Constants for Isotopic Exchange Reactions // J. Chem. Phys., 1947. – V.15. – P. 261-273.
15. Polyakov V.B., Ustinov V.I. Isotope equilibrium-constants (beta-o-18 factors) of corundum // Geochimica, 1997. – N 10. - P. 1019-1025.
16. Warburg E. Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Coerzitivkraft // Ann. Phys., 1881. - V.13. - P.141.
17. Андреев А.С., Белов К.П., Никитин С.А., Тишин А.М. Магнитокалорический эффект в редкоземельных магнитных материалах // УФН, 1989. - Т.158. - №4. - С.553- 579.
18. Белов К.П. Магнитотепловые явления в редкоземельных магнетиках. М.: Наука, 1990. - 94 с.
19. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.А., Колотков А.А. Нелинейное Зеемановское расщепление колебательно-вращательных линий спектра поглощения молекул NO в сильном магнитном поле. Препринт №18. - М.: ФИАН РАН, 2009.
20. Нейман В.А., Семченко И.С. / В сб. Изотопы: технологии, материалы и применение: Материалы Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Томск: Изд-во ТПУ, 2014. - С. 66-67.

References

1. Buchachenko A.L., Sagdeev R.Z., Salichov K.M. Magnitnie i spinovie effecty v chimicheskikh reakziyach / Pod red. Yu.N. Molina. – Novosibirsk: Nauka, 1978. - 296 s.

2. Buchachenko A.L., Kusnezov D.A. Magnitny isotopny effect magnia – kluch k mekhanochimii fosforilyruyuchich fermentov kak molekularnich maschin // *Molekularnaya biologia*, 2006. – Т.40. - №1. – S. 12-19.
3. Hans E. Lundager Madsen Theory of electrolyte crystallization in magnetic field // *Journal of Crystal Growth*, 2007. - V. 305, Issue 1. - P. 271-277.
4. Urey H.C., Greiff L.I. Isotope exchange equilibria // *J. Chem. Phys.*, 1935. - V. 3. - P. 321-327.
5. Nikolaev A.V., Yakovlev I.I. Klatratoobrasovanie i fisico-chimicheskiy analiz ekstrakcionnykh sistem, Novosibirsk: Nauka, 1975. -190 s.
6. Rumer Yu.B., Ryvkin M.Sch. Termodinamika, ststisticheskaya fizika i kinetika. - M.: Nauka, 1977. - 552 p.
7. Masalov L.N. Electronno-strukturnye faktory v ekstrakzii // *Zurnal strukturnoy khimii*, 2003. – Т.44. №1. – S. 7-38.
8. Dauletbay A.D., Myrsaliev S.K. O vosmozhnykh rasdeleniy isotopov srednykh i tyazhelykh elementov metodom khimicheskogo obmena // *Pischevaya tekhnologiya i servis*, 2010. - №3. – S.93-97.
9. Semiokhin L.A. Chemical Methods of Stable Isotope Separation // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1996. - V. 205, N 2. P. 201-213.
10. Zavoronkov N.M., Knyazev D.A., Ivlev A.A., Klinskiy G.D. Termodinamika reaktsiy isotopnogo obmena // *Uspechi khimii*, 1980. - T. 49. - Vip. 3. - S.384-419.
11. Knyazev D.A., Bochkarev A.V., Myasoedov N.F. // *Separation Science and Technology*, 2001. – V.36. – P. 1595-1675.
12. Knyazev D.A., Myasoedov N.F., Bochkarev A.V. Teoriya ravnovesnykh isotopnykh effektov vodoroda // *Uspechi khimii*, 1992. – V.61. N 2. - 384-414.
13. Bron J., Chang C.F., Wolfsberg M. Isotopic partition function ratios involving H₂, H₂O, H₂S, H₂Se and NH₃ // *Z. Naturforsch.*, 1973. - V. 28a. - P. 129–136.
14. Bigeleisen J., Mayer M.G. Calculation of Equilibrium Constants for Isotopic Exchange Reactions // *J. Chem. Phys.*, 1947. – V.15. – P. 261-273.
15. Polyakov V.B., Ustinov V.I. Isotope equilibrium-constants (beta-o-18 factors) of corundum // *Geochimica*, 1997. – N 10. - P. 1019-1025.
16. Warburg E. Magnetische Untersuchungen über einige Wirkungen der Coerzitivkraft // *Ann. Phys.*, 1881. - V.13. - P.141.
17. Andreenko A.S., Belov K.P., Nikitin S.A., Tischin A.M. Magnitokaloricheskiy effect v redkosemelnykh magnitnykh materialakh // *Uspechi fizicheskikh nauk*, 1989. - T.158. - №4. - S.553- 579.
18. Belov K.P. Magnitoteplovye yavleniya v redkosemelnykh magnetikakh. M.: Nauka, 1990. - 94 s.
19. Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.A., Kolotkov A.A. Nelineynoe Zeemanovskoe rascheplenie kolebatelno-vraschatelnykh liniy spektra pogloscheniya molekul NO v silnom magnitnom pole. Preprint №18. - M.: FIAN RAN, 2009.
20. Neyman V.A., Semchenko I.S. / V sb. Isotopy: tekhnologii, materialy i primeneniye: Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, Tomsk: Isd-vo TPU, 2014. - S. 66-67.