

УДК 533.92; 539.196.5

UDC 533.92; 539.196.5

**ИЗОТОПНОЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПРОДУКТАХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАЗРЯДАХ**

**ISOTOPIC REDISTRIBUTION IN PRODUCTS OF PLASMA PROCESSES FOR HIGH FREQUENCY DISCHARGES**

Мышкин Вячеслав Федорович  
д.ф.-м.н., доцент

Mishkin Viacheslav Fedorovich  
Dr.Sci.Phys.-Math., professor

Власов Виктор Алексеевич  
д.ф.-м.н., проф.

Vlasov Viktor Alekseevich  
Dr.Sci.Phys.-Math., professor

Гамов Денис Леонидович

Gamov Denis Leonidovich  
post-graduate student

Бурдовицын Антон Николаевич  
*Томский национальный исследовательский политехнический университет, Томск, Россия*

Burdovichin Anton Nikolaevich  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

Хан Валерий Алексеевич  
д.т.н.  
*Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

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

Проведен анализ результатов исследований, выполненных по плазменным методам разделения изотопов. Установлено, что в результатах исследований последних лет приводятся высокие значения коэффициентов разделения для промежуточных продуктов. Нами показано, что эти коэффициенты будут значительно уменьшены в последующих плазменных процессах и пути замораживания высокого значения коэффициента разделения изотопов

Researches in plasma methods for isotopes separation and analyze of the results were done. Results show high values of separation coefficient for intermediate products during the last years. It is shown by us, that these factors will be considerably reduced in the subsequent plasma processes and a way of freezing of high value of factor of division of isotopes

Ключевые слова: ИЗОТОП, РАДИКАЛ, ПЛАЗМА, ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД, КОЭФФИЦИЕНТ РАЗДЕЛЕНИЯ

Keywords: ISOTOPE, RADICAL, PLASMA, GAS DISCHARGES, SEPARATION COEFFICIENT

В связи с постоянным увеличением потребности в обогащенных по различным изотопам материалах, а также необходимости сепарации изотопных смесей облученных на АЭС материалов, исследования по разработке методов сепарации изотопных смесей, являются актуальными [1]. Фактором, сдерживающим расширение применения моноизотопных элементов и переработки облученных материалов является большие затраты энергии. Поэтому необходим поиск новых более эффективных

методов, чем существующие методы сепарации смесей изотопов [2].

Зачастую при формировании различных структур с измененным изотопным составом, относительно природного, используют обогащенные реагенты. Например, слои кремния с аморфной структурой, отличающиеся изотопным составом от природного распределения изотопов, были получены методом плазмохимического осаждения с использованием изотопно-модифицированного тетрафторида кремния [3].

Неравновесная низкотемпературная плазма позволяет осуществлять селективные химические реакции с высокой скоростью. При этом варьирование параметров плазмы дает возможность управлять химическими процессами, направлять их по нужному каналу и оптимизировать их энергетическую эффективность [4].

Большим разнообразием отличаются механизмы, по которым осуществляются в неравновесных условиях химические реакции. Один и тот же суммарный процесс в зависимости от степени ионизации, электронной температуры, давления и удельной энергонапряженности разряда может осуществляться принципиально различным образом, с существенно отличающейся энергетической эффективностью. Для случая тлеющего разряда было проведено подробное исследование механизмов ряда неравновесных плазмохимических процессов [5]. В частности, были определены основные реакции, определяющие диссоциацию в тлеющем разряде азота, аммиака и углекислого газа.

Известно, что для молекул таких молекул, как  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ , колебательное возбуждение электронным ударом происходит не в прямом столкновительном процессе (имеющем слабую эффективность из-за малости отношения масс электрона и молекулы), а через образование промежуточного автоионизационного состояния. Благодаря этому скорость колебательного возбуждения таких молекул достаточно высока, и основная доля разрядного энерговыклада локализуется именно на колебательных степенях

свободы. Это явление может обеспечить селективность и, как следствие, высокую энергетическую эффективность процессов с участием изотопов.

Поддержание колебательной неравновесности ( $T_v > T_o$ ) обеспечивается при этом малостью скорости VT-релаксации при низкой поступательной температуре  $T_o$ . Для неравновесной плазмохимии рассмотренный процесс колебательного возбуждения молекул электронным ударом характеризуется важным специфическим преимуществом. Этот механизм может стимулировать химические превращения с наибольшей, по сравнению с другими каналами плазмохимических реакций, энергетической эффективностью.

Химические реакции в условиях электрических разрядов для изотопов одного и того же элемента протекают с различной вероятностью. Известно, что разделение изотопов в плазмокаталитических реакциях происходит с высокой эффективностью [6]. Эффект изменения изотопного состава продуктов плазмохимических реакций известен с 60-х годов [7]. В настоящее время разработки в направлении формирования модифицированных по изотопам структур продолжается [3].

Одна из первых работ по плазмохимическому разделению изотопов [8] посвящена исследованию изотопных эффектов при окислении медных и железных электродов в электрическом дуговом разряде. В экспериментах металлические электроды подвергались окислению кислородом, полученным путем разложения  $KMnO_4$ . Окисленный металл постепенно осыпался на дно газоразрядной камеры из кварцевого стекла. Электроды цилиндрической формы крепились на молибденовых вводах через кварцевое стекло.

Со стальными электродами было проведено четыре серии опытов. Давление газовой смеси в замкнутом объеме, включающем объем разрядника, изменяли в диапазоне от 320÷350 мм рт.ст. до 70÷80 мм рт.ст. В опытах первой серии образовавшийся озон циркулировал в системе вместе с кислородом. Во второй серии эксперимента для разложения озона

газовая смесь перед поступлением в разрядник нагревалась до 150°C. В этих двух сериях проводился масс-спектрометрический анализ, как исходного кислорода, так и кислорода, оставшегося после реакции. В третьей серии опытов образовавшийся озон осаждался в ловушке. В этом случае проводился масс-спектрометрический анализ исходного кислорода, кислорода остатка и кислорода, получившегося от термического разложения озона. В четвертой серии эксперименты проводились при атмосферном давлении, причем кислород из баллона проходил через реометр в охлаждаемый разрядник. Озон вымораживался в ловушке, а кислород выходил в атмосферу. После эксперимента озон очищался от кислорода путем вакуумной отгонки при температуре жидкого азота до давления  $6 \times 10^{-2}$  мм рт.ст.

Масс-спектрометрический анализ проводился на приборе МИ-1305. Установлено, что тяжелый изотоп кислорода  $O^{18}$  накапливается в остатке непрореагировавшего газа. Коэффициент разделения в первой серии опытов составлял  $1,07 \pm 0,01$ ; во второй -  $1,074 \pm 0,010$ ; в третьей -  $1,00 \pm 0,01$ ; в четвертой -  $1,08 \pm 0,01$ .

В опытах с медными электродами было установлено, что коэффициентом разделения составляет  $1,10 \pm 0,02$ , который не зависит в пределах ошибок экспериментов от электрической мощности и скорости газового потока через разряд.

Скорость реакции окисления также оценивалась при различных значениях электрического и магнитного полей (магнитное поле  $0,2 \div 1,0$  Тл). Установлено, что с увеличением напряженности электрического поля скорость реакции увеличивается, а коэффициент разделения уменьшается до 1. При напряжении на пластинах 1000 В коэффициент разделения составлял  $1,03 \pm 0,01$ . В магнитном поле наблюдается некоторое сжатие зоны разряда. Скорость реакции окисления протекает также более интенсивно при увеличении напряженности магнитного поля.

Для изучения характера перераспределения изотопов кислорода при синтезе углекислого газа в дуговом разряде газообразный кислород из баллона пропускали через разрядную трубку из кварцевого стекла, охлаждаемую в термостате [9]. Электроды трубки в виде цилиндров из графита повышенной чистоты прикреплялись к молибденовым вводам. Дуговой разряд между графитовыми электродами осуществлялся с помощью дугового генератора типа ДГ-1.

В дуге переменного тока графит вступал в реакцию с газообразным кислородом. Продукт реакции (углекислый газ) осаждался в ловушке, охлаждаемой жидким азотом. Анализ продуктов реакции проводился газоанализатором ГХП-3М и на масс-спектрометре МИ-1305. Он показал наличие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и отсутствие окиси углерода  $\text{CO}$ . Не участвовавший в реакции кислород выходил в атмосферу.

Вначале исследований газовая камера откачивалась до  $10^{-2}$  мм рт.ст., затем в нее напускался кислород. При давлении в системе несколько выше атмосферного производилась 5-10-кратная продувка установки кислородом. Далее устанавливался постоянный поток кислорода и включался дуговой разряд.

Газовая смесь проходила через ловушку, охлаждаемую жидким азотом до температуры  $-130^\circ\text{C}$ , что позволяло полностью удалять из нее частично осадившийся, вместе с  $\text{CO}_2$ , кислород. При давлении  $10^{-2}$  мм рт.ст. вентиль, выпускающий в атмосферу газ, закрывался, а сосуд Дьюара убирался. Твердый углекислый газ испарялся и поступал в предварительно откачанную гребенку из ампул, из которых в дальнейшем проводился изотопный анализ углекислого газа на масс-спектрометре МИ-1305 по пикам изотопных модификаций  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$ ,  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$  и  $^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$ .

Эталонные пробы углекислого газа приготавливались на циркуляционной установке, подобной описанной в работе [7]. Реакция окисления начиналась при давлении кислорода в системе  $70\div 80$  мм рт.ст. и

заканчивалась при 0,5 мм рт.ст. Пробы углекислого газа отбирались в вакуумируемый сосуд. Погрешность изотопного состава, возникающая в процессе приготовления эталонных проб, не превышала 1%.

В результате экспериментов установлено, что тяжелый изотоп  $^{18}\text{O}$  накапливается в углекислом газе с коэффициентом разделения  $1,098 \pm 0,010$ . Коэффициент разделения не зависит, в пределах ошибок экспериментов, от мощности разряда в интервале 17÷75 Вт и от скорости газового потока в интервале 2÷12 л/мин.

Изучению изотопного эффекта при синтезе оксида азота в высокочастотном безэлектродном разряде посвящена работа [10]. В качестве плазмообразующего газа использовали воздух. Безэлектродный разряд возбуждался в реакторе из кварцевого стекла длиной 300 мм и диаметром 40 мм, который предварительно откачивался до давления 0,5÷1 мм рт. ст. После возбуждения разряда давление в реакторе увеличивалось до атмосферного. Выход NO (в объёмн. %), при скорости потока воздуха через реактор 10 л/мин, достигал 1,5%. Колебательная мощность высокочастотного генератора составляла 2 кВт, частота - 25 МГц. Образовавшийся в разряде оксид азота окислялся до двуоксида и вымораживался жидким азотом. В результате масс-спектрометрического анализа установлено, что при синтезе оксида азота в ВЧ безэлектродном разряде происходит обогащение азота изотопом  $^{15}\text{N}$  по сравнению с исходным атмосферным воздухом. Коэффициент разделения изотопов азота составлял  $1,032 \pm 0,008$ .

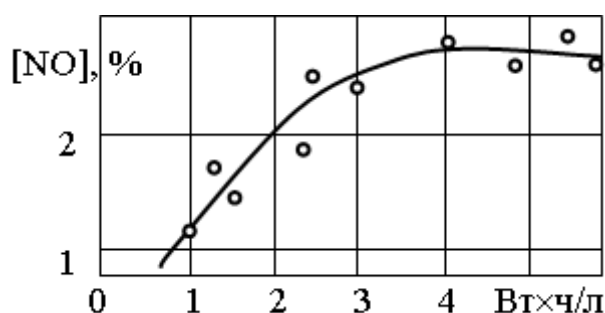
В работах [7, 11] было показано, что при синтезе озона в тихом разряде происходит заметное разделение изотопов кислорода.

Изучался изотопный эффект для азота и кислорода при синтезе оксида азота в дуговом разряде [12]. Для этого азот и кислород из баллонов поступали в смеситель, проходили систему осушительных колонок, наполненных соответственно силикагелем, едким калием и фосфорным

ангидридом. Относительное содержание азота и кислорода определялось газоанализатором ГХП-3М. После осушки газовая смесь поступала в разрядник. Образовавшийся оксид азота окислялся до двуокиси, затем вымораживался при температуре  $-110^{\circ}\text{C}$ . Контроль температуры осуществлялся медно-константановой термопарой. Непрореагировавшие азот и кислород выбрасывали в атмосферу.

Разрядная камера выполнена из кварцевого стекла с внутренним диаметром трубки 20 мм. Electroды, в виде цилиндров из нержавеющей стали, крепились к молибденовым вводам, расстояние между электродами составляло 6 мм. После выхода из зоны разряда нагретый газ охлаждался в спиральном змеевике проточной водой. В разряднике создавалась электрическая дуга переменного тока низкого напряжения генератором ДГ-1. Мощность разряда определялась калориметрическим методом. При изменении тока разряда от 1 до 4 А мощность изменялась от 27 до 75 Вт соответственно.

На рис. 1 приведен график зависимости концентрации оксида азота от удельной энергии при атмосферном давлении для исходной смеси газов 50%  $\text{O}_2$  и 50%  $\text{N}_2$ . Максимальная концентрация оксида азота в смеси, достигнутая в этих экспериментах, равнялась 2,7% объемных.



**Рис. 1.** Зависимость концентрации NO от удельной энергии разряда

Включение электрической дуги в разряднике производилось после того, как рабочая смесь газов полностью вытесняла из системы воздух. После вымораживания в ловушке необходимого количества двуокиси

азота ее соединяли с остальной системой и производили откачку до давления  $2 \cdot 10^{-2}$  мм рт.ст. Давление в системе измерялось термомпарным вакуумметром и ртутным манометром. Очищенная двуокись азота размораживалась и переводилась в газообразное состояние.

Пробы для масс-спектрометрического анализа готовились следующим образом: очищенная газообразная двуокись азота подавалась в дополнительный разрядник до давления  $150 \div 200$  мм рт.ст., где происходило ее разложение на азот и кислород. Электроды разрядника присоединялись к генератору конденсированной искры ИГ-2. Азот и кислород для анализа отбирались в предварительно откаченную стеклянную ампулу. Ампула затем отпаивалась.

Для проверки того, что при приготовлении пробы не происходило дополнительного изотопного фракционирования, пробы азота готовились и по другой методике. Для этого двуокись азота поглощалась раствором перекиси водорода с образованием азотной кислоты. Азотная кислота сплавом Дебарда восстанавливалась до аммиака, который затем полностью улавливался 0,5N раствором соляной кислоты. Пробы молекулярного азота для масс-спектрометрического анализа получались действием гипобромита натрия на раствор  $\text{NH}_4\text{Cl}$  в вакуумной установке. Результаты изотопного анализа проб, приготовленных из одного образца по различным методикам, оказались одинаковыми в пределах ошибок измерений. Коэффициент разделения изотопов азота и кислорода рассчитывался по формуле

$$\alpha_p = \frac{c [1 - c_o]}{c_o (1 - c)},$$

где  $c$  - изотопная концентрация  $\text{N}^{15}$  или  $\text{O}^{18}$  в двуокиси азота, а  $c_o$  - концентрация  $\text{N}^{15}$  или  $\text{O}^{18}$  в исходной смеси. Установлено, что двуокись азота обедняется по изотопам  $\text{N}^{15}$  или  $\text{O}^{18}$  в сравнении с исходной смесью. Данные по коэффициентам разделения в зависимости от мощности разряда



приведены в табл. 1.

При мощности разряда 45 Вт была определена зависимость коэффициента разделения при различных скоростях потока через зону разряда. На основании того, что коэффициент разделения практически не зависит от времени, можно сделать заключение о кинетической природе данного изотопного эффекта. Не влияет на величину коэффициента разделения и соотношение между концентрациями кислорода и азота. Эксперименты проводились также со смесями, имеющими исходный состав: 20% O<sub>2</sub> - 80% N<sub>2</sub> и 80% O<sub>2</sub> - 20% N<sub>2</sub>. Коэффициент разделения для азота составлял 0,963±0,005, для кислорода - 0,9554±0,005.

Таблица 1. Коэффициенты разделения

Ток разряда, A	1	2	3	4
азот	0,961	0,971	0,958	0,963
кислород	0,954	0,950	0,961	0,953

Примечание: Исходная смесь содержала 50% N<sub>2</sub> и 50% O<sub>2</sub>, расход - 1 л/мин

Об изотопической селективности в заселении верхних колебательных уровней молекул азота в возбужденных состояниях  $\nu$ , возникающей за счет неравновесного колебательного обмена молекул  $^{14}\text{N}_{2(\nu)}$  и  $^{14}\text{N}_{(\nu)}^{15}\text{N}_{(\nu)}$ , и о возможности обогащения продуктов диссоциации или химической реакции  $\text{N}_{2(\nu>12)} + \text{O} = \text{NO} + \text{N}$  изотопом  $^{15}\text{N}$  сообщалось в работе [13]. Показано, что неравновесный колебательный обмен, может привести к тому, что верхние колебательные уровни заселяются преимущественно молекулами, содержащими атомы  $^{15}\text{N}$ . Тогда реакции диссоциации колебательно возбужденных молекул или реакции атомно-молекулярного изотопного обмена, идущие с преимущественным участием молекул азота, находящихся на верхних колебательных уровнях [14], должны приводить к изотопическому обогащению атомов азота. Обогащение этих атомов не может быть выше, чем изотопическая селективность заселения высоких

колебательных уровней молекул азота, с которых идут эти процессы.

В более поздней экспериментальной работе исследовался изотопный состав атомов в послеразрядной зоне импульсного разряда в потоке азота. С помощью ЭПР спектрометра показано, что в послеразрядной зоне концентрация атомов убывает, а относительное содержание изотопа  $^{15}\text{N}$  в них возрастает более чем в 30 раз от своего природного значения (коэффициент разделения – 30) [15]. Такое изотопическое обогащение атомов азота более чем в четыре раза превосходит максимальное значение, предсказываемое существующей теоретической моделью. Авторы исследования считают, что селективная по изотопам диссоциация молекул азота происходит в послеразрядной зоне после рекомбинации на поверхности трубки большей части атомов, образовавшихся в зоне разряда. Этот эффект авторами работы объясняется моделью двухстадийного обогащения изотопом  $^{15}\text{N}$  высоких колебательных уровней электронно-возбужденного состояния  $\text{N}_2(\text{V}^3\Pi_g, \nu)$  с последующей диссоциацией этого состояния при  $\nu > 12$ .

Заметный изотопический эффект при конверсии углекислого газа в СО в СВЧ разряде впервые описан в работе [16]. При энергокладе 7 Дж/см<sup>3</sup> степень конверсии  $^{12}\text{CO}_2$  в 2,5 раза превышает соответствующую величину для изотопной модификации  $^{13}\text{CO}_2$ .

Процессами, протекающими в зоне после разряда, можно объяснить и то, что в потоке молекул  $\text{CO}_2$ , прошедших через зону СВЧ разряда, а затем еще почти 10 метров до лазерного спектрометра [17], наблюдалось отношение степеней диссоциации молекул  $^{12}\text{CO}_2$  к  $^{13}\text{CO}_2$  равное 2,5 (коэффициент разделения – 2,47), а при аналогичных условиях в разряде, но при отборе проб для масс-спектрометрического анализа вблизи зоны разряда не было замечено отличия этого отношения от единицы в пределах точности эксперимента. (в зоне после разряда зарегистрированы высокие значения

обогащения атомарной компоненты азота изотопом  $^{15}\text{N}$  и непродиссоциировавших молекул  $\text{CO}_2$  изотопом  $^{13}\text{C}$ ).

Однако, в результатах других авторов, приведенных в указанной работе, для такого процесса приводится увеличение относительного содержания  $^{15}\text{N}$  лишь в 8 и 10-12 раз. Очень высокий коэффициент разделения, приведенной в работе [15] может быть объяснен лишь тем, что коэффициенты разделения указаны для промежуточного (химически активного), а не конечного состава газовой смеси.

Для реализации столь эффективного разделения изотопов азота и углерода необходим поиск путей, приводящих к замораживанию изотопного состава промежуточных продуктов плазменных и последующих процессов обмена изотопами. Поэтому в случае СВЧ разряда послеразрядная область может быть более перспективной для разделения изотопов в процессе химических реакций между радикальными парами, чем область, занимаемая плазмой.

Нами разрабатываются плазмохимические способы разделения изотопов, связанные с использованием методов целенаправленного управления химической активностью продуктов диссоциации в плазме. При этом плазменные процессы используются, в основном, для атомизации исходного сырья, находящегося в газообразном, жидком или твердом состоянии. Например, для атомизации молекулярных газов можно использовать ВЧ или СВЧ разряды, для атомизации твердого сырья – ВЧ факельный или дуговой разряды.

Результаты рассмотренных выше статей показывают, что диссоциация газа в условиях низкотемпературной высокочастотной плазмы может происходить с высокой селективностью по отношению к различным изотопным модификациям молекул.

Задачей оказания внешних воздействий на плазменную систему во внешнем магнитном поле является управление химической активностью

сталкивающихся радикалов. В этом случае для увеличения (уменьшения) концентрации заданных возбужденных состояний можно использовать резонансные потоки лазерного, СВЧ и ВЧ излучений. Для лучшей корреляции времени между столкновениями радикалов и частоты электронных парамагнитных резонансов (с учетом времени жизни возбужденных состояний) целевых изотопов можно изменять давление и поперечные размеры реакционной камеры.

Математическая модель физико-химических процессов между радикальными парами в газовой фазе нами сформулирована и приведена в работе [18]. Оценочные расчеты, проведенные нами для окислительных процессов углерода и азота в послеразрядной области разряда, показывают возможность эффективного разделения изотопов с магнитными и немагнитными ядрами.

**ВЫВОД.** Проведен анализ результатов выполненных исследований по плазменным методам разделения изотопов, на основе которых показаны перспективные способы замораживания высокого изотопного состава в продуктах плазмохимических реакций.

Работа финансируется в рамках проекта ФЦП 2010-1.2.1-102-019-031.

#### Список использованной литературы

1. Хан В.А., Мышкин В.Ф., Бурдовицын А.Н., Серебренников В.С. Влияние изотопного состава на коэффициент затухания сигнала в кварцевом волокне // Электросвязь. - 2008. - № 4. - С. 57-60.
2. О возможности использования микроволнового и лазерного излучений для интенсификации плазмохимических реакций Хан В.А., Власов В.А., Серебренников В.С., Бурдовицын А.Н., Мышкин В.Ф. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2008. - № 41. - С. 1-13.
3. П.Г. Сенников, С.В. Голубев, В.И. Шашкин, Д.А. Пряхин, М.Н. Дроздов, Б.А. Андреев, Н.-J. Pohl, О.Н. Годисов Получение слоев изотопно-модифицированного кремния методом стимулированного плазмой осаждения из газовой фазы тетрафторида кремния // Письма в ЖТФ. - 2009. – Т.35. - Вып. 20. - С.41-47
4. В.Д. Русанов, А. Л. Фридман, Г. В. Шолин Физика химически активной плазмы с неравновесным колебательным возбуждением молекул // Успехи физических наук - 1981. – Т.134. - Вып. 2. - С.185-235.
5. Словецкий Д.И. Механизмы химических реакций в неравновесной плазме. — М.: Наука, 1980.

6. О разделении изотопов в ходе химических реакций, протекающих в электрическом разряде [Текст] : препринт / И.С. Батулин, Н.М. Горшунов, Ю.П. Нецименко. - М., 1990. - 20 с. - (Препринт / Московский инж.-физ. ин-т ; 054-90)
7. Тихомиров И.А., Меленевский В.Н. Исследование изотопного эффекта при электросинтезе озона по методике Релея. // Ж. физ. химии. - 1962. - Т.36. - С.895.
8. Басов Ю.Г., Тихомиров И.А.. Изотопные эффекты при окислении железных и медных электродов в дуговом разряде // Ж. физ. химии. 1967. - Т.41. - №9. - С.2286-2288.
9. Басов Ю.Г., Тихомиров И.А., Меленевский В.Н. Разделение изотопов кислорода при синтезе углекислого газа в дуговом разряде // Ж. физ. химии. - 1967. - Т.41. - №12. - С.3080-3081.
10. Меленевский В.Н., Тихомиров И.А., Теплоухов В.Л.. Разделение изотопов азота при синтезе окиси азота в высокочастотном безэлектродном разряде // Ж. физ. химии. 1967. - Т.41. - №11. - С.2842-2843.
11. Семиохин И.А., Панченков Г.М., Коровкин В.К. Разделение изотопов кислорода в процессе электросинтеза озона // Ж. физ. химии. - 1962. - Т.36. - С.2561.
12. Меленевский В.Н., Тихомиров И.А., Басов Ю.Г. Разделение изотопов азота и кислорода при синтезе окиси азота в дуговом разряде // Изв. ТПИ. - 1967. - Т.148. - С.178-181.
13. Э.М. Беленов, Е.П. Маркин, А.Н. Ораевский и др. Новые методы разделения изотопов // Письма в ЖЭТФ – 1977. - Т.72. - В.3.
14. A. Lagana, E. Carcia and L. Ciccarelli Deactivation of vibrationally excited nitrogen molecules by collision with nitrogen atoms// J. Phys. Chem. – 1987. – V.91. - P.312-314.
15. Н.М. Горшунов, С.В. Гуденко Обогащение изотопом  $^{15}\text{N}$  атомарной компоненты азота в послеразрядной зоне // Письма в ЖЭТФ. – 2003. - Т.77. – Вып.4. - С.192-196.
16. М.А. Керимкулов, В.Н. Очкин, С.Ю. Савинов, М.В. Спиридонов, С.Н. Цхай Наблюдение обратного изотопического эффекта при плазмохимическом разложении углекислого газа // Письма в ЖЭТФ. - 1991. - Т.54. - Вып.4. - С.212-215.
17. С.Н.Андреев и др. Изотопические эффекты при разложении углекислого газа в неравновесной газоразрядной плазме // ЖТФ. - 1994. - Т.64. – Вып.5. - С.20-21.
18. Мышкин В.Ф., Хан В.А., Борисов В.А. Кемельбеков Б.Ж. Разработка метода разделения изотопов углерода с магнитными и немагнитными ядрами// Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – №7(61). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2010/07/pdf/09.pdf>