

На правах рукописи



Меньшиков Пётр Леонидович

**О МЕХАНИЗМАХ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ И
ЭЛЕМЕНТОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ**

01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных
состояний вещества

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в НИЦ «Курчатовский институт»

Научный руководитель: **Григорьев Геннадий Юрьевич**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Борисевич Валентин Дмитриевич – доктор физико-математических наук,
профессор, НИЯУ «МИФИ»

Есеев Марат Каналбекович – доктор физико-математических наук,
доцент, Северный (Арктический) федеральный университет им.
М.В. Ломоносова

Ведущая организация: **Московский физико-технический институт**
(государственный университет)

Защита состоится «20» декабря 2016 г. на заседании диссертационного
совета Д520.009.05 на базе НИЦ «Курчатовский институт» по адресу:
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский
институт» и на сайте <http://www.nrcki.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
д.х.н.



В.Ф.Серик

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Согласно доступным литературным данным технологии лазерного разделения изотопов в струях путём селективного низкоэнергетического возбуждения многоатомных молекул с целью подавления их кластеризации могут стать альтернативой центрифужным методам. Впервые этот метод был осуществлён для изотопов серы на молекулах SF_6 в опытах Ван ден Берга. В случае тяжёлых элементов, например, UF_6 , задача усложняется вследствие малости величины изотопического сдвига частот молекулярных колебаний. По этой причине здесь требуется понимание деталей происходящих процессов, чем и определяется актуальность теоретических исследований в данной области.

Прежде всего, необходимо знать профиль колебательной температуры гексафторидов в струе газа-носителя с погрешностью ≤ 10 К. Подходящим для этого методом является измерение ИК спектров поглощения в полосе ν_3 – моды. Для его применения требуется создать теоретическую модель описания и расчёта этих спектров.

С целью выбора оптимальной для разделения интенсивности лазера необходимо разработать модель резонансного возбуждения ν_3 – моды с учётом эффектов её ангармонизма и передачи энергии в другие колебательные моды.

В современном ядерном топливном цикле, в особенности при подходах по его замыканию, имеется проблема отделения из материалов примесей, вызывающих, например, активацию в нейтронном потоке. В случае малых концентраций примесей применение физико-химических методов часто оказывается трудоёмким и дорогим. По этой причине актуален поиск других методов решения указанной проблемы.

Цели и задачи

Целями данной работы являются:

1) Построение расчётной модели для вычисления формы колебательно-вращательных ИК спектров поглощения молекул при разных температурах, позволяющей по измеренным спектрам определить профиль колебательной температуры гексафторидов в струе с точностью ≤ 10 К.

2) Построение модели резонансного низкоэнергетического лазерного возбуждения колебаний многоатомной молекулы с учётом ангармонизма резонансной моды, а также эффектов передачи энергии в другие моды колебаний.

3) Изучение вызванного центробежными силами неравновесного дрейфового и диффузионного движения компонентов газовой смеси в струе, движущейся в изогнутом канале.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в следующих, полученных впервые результатах:

- Соискателем предложена модель расчета формы колебательно-вращательных ИК спектров поглощения молекул гексафторидов при разных температурах, позволяющая определить профиль колебательной температуры этих молекул в расширяющихся сверхзвуковых струях по форме спектров поглощения спектров с погрешностью < 10 К, достаточной для экспериментов по исследованию методов селективного низкоэнергетического лазерного разделения изотопов.
- Разработана модель резонансного низкоэнергетического лазерного возбуждения колебаний многоатомных молекулы с учётом ангармонизма резонансной моды, а также эффектов передачи энергии в другие моды

колебаний. Обнаружен пороговый по интенсивности лазера эффект колебательного возбуждения молекулярных колебаний.

- В рамках предложенной модели обнаружен эффект резкого увеличения центробежного разделения газовой смеси в струе, движущейся в искривлённом канале, в начальном неравновесном режиме, когда больцмановское распределение концентраций газов ещё не установилось.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается как надёжностью использованных теоретических методов, так и согласием с имеющимися экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту

1) Предложена модель расчёта формы колебательно-вращательных ИК спектров поглощения молекул гексафторидов при разных температурах. Предложенная модель позволяет определять колебательную температуру молекул по форме спектра с погрешностью ≤ 10 К.

2) Разработана модель резонансного низкоэнергетического лазерного возбуждения колебаний многоатомной молекулы с учётом ангармонизма резонансной моды, а также эффектов передачи энергии в другие моды колебаний. Обнаружен пороговый по интенсивности лазера эффект возбуждения молекулярных колебаний.

3) Обнаружен эффект резкого увеличения центробежного разделения газовой смеси в струе, движущейся в искривленном канале, в начальном неравновесном режиме, когда больцмановское распределение концентраций газов ещё не установилось.

Личный вклад автора

Личный вклад автора в совместной работе с соавторами заключается в следующем:

1. Непосредственное участие в разработке теоретической модели описания ИК спектров поглощения гексафторидов и проведении численных расчётов по этой модели.

2. Непосредственное участие в создании теоретической модели порогового по интенсивности лазера эффекта резонансного возбуждения многоатомных молекул и проведение численных расчётов.

3. Непосредственное участие в разработке теории центробежногоразделения газовых смесей в неравновесных условиях и проведение соответствующих численных расчётов, позволивших в конечном итоге обнаружить эффект резкого увеличения коэффициента разделения в таких условиях.

4. Подготовка публикаций по результатам выполненной работы.

Практическая значимость

Развитая теоретическая модель расчёта формы ИК спектров поглощения гексафторидов в области частот вблизи полосы ν_3 позволяет бесконтактным образом измерять колебательную температуру этих молекул, в частности, UF_6 , в быстрорасширяющихся струях с погрешностью ≤ 10 К. Эта величина погрешности приемлема при разработке методов низкоэнергетического селективного изотопного разделения молекул UF_6 .

Приведённый в диссертации расчёт спектра молекул в полосе составного колебания $\nu_1+\nu_3$ необходим для разработки методов дистанционного измерения степени обогащения гексафторида урана.

Обнаруженный и представленный в диссертации эффект пороговой зависимости амплитуды колебаний от интенсивности излучения лазера следует учитывать при оптимизации величины интенсивности лазера, необходимой для селективного по изотопам низкоэнергетического возбуждения колебаний молекулы.

Указанный в диссертации эффект резкого увеличения коэффициента центробежного разделения газовых смесей в неравновесных условиях позволяет говорить об эффективности и практической применимости метода отделения малых примесей в сверхзвуковых струях, движущихся по искривленным каналам. Нестационарный коэффициент центробежного обогащения газов минимум на порядок превосходит достигаемый в стационарном случае. Указанный метод отделения примесей может стать альтернативой физико-химическим методам очистки, особенно при малых концентрациях примесей, когда применение физико-химических методов является трудоёмким и дорогостоящим.

Апробация работы

Результаты работы были представлены:

- 1) на XVIII Международном симпозиуме и школе молодых учёных “Молекулярная спектроскопия высокого разрешения” (HighRus-2015) в 2015г. вТомске;
- 2)на международной конференции TDLS-2015 в Москве;
- 3) на XIII Курчатовской молодёжной научной школе. Москва. Россия. 27-30 октября, 2015;
- 4) на XXV Съезде по спектроскопии, Москва-Троицк, 3 - 7 октября 2016 (два доклада).

Публикации

По материалам диссертации опубликованы две статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 5 тезисов докладов.

Структура и объём диссертации

Работа состоит из введения, литературного обзора, трёх основных глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 101 страницу и 29 рисунков. Список литературы включает 61 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи работы, приведен список положений, выносимых на защиту. Обсуждается практическая значимость полученных результатов. Также во введении представлен список публикаций работ, подготовленных по результатам исследований.

В **первой главе («Постановка задачи и обзор литературы»)** сначала дан краткий обзор по методам лазерного разделения изотопов, основанных на селективной ионизации и возбуждении атомов, а также на селективной многофотонной диссоциации молекул. Далее более подробно приводится обзор исследований селективных процессов с малыми энергетическими затратами, и не приводящих к изменению химической формы облучаемых молекул, которым в основном и посвящена диссертация. Более кратко подобные подходы называют низкоэнергетическими методами лазерного разделения изотопов. Рассматриваются методы лазерного селективного подавления кластерообразования в струях, а также лазерной преддиссоциации кластеров изотопов и элементов. Приводятся известные из литературы данные об этих методах. В частности, обсуждаются опыты группы Ван ден Берга (H.vandenBergh) и приводятся опубликованные сведения о подходе SILEX. Лазерные низкоэнергетические методы разделения изотопов сравниваются с методом ИК МФД (инфракрасная многофотонная диссоциация молекул), известным также как МЛИС.

Делается вывод о преимуществах низкоэнергетических методов по сравнению с другими подходами лазерного разделения изотопов.

Вторая глава посвящена описанию физической модели расчёта колебательно-вращательных ИК спектров гексафторидов, в частности UF₆, в модах ν_3 и $\nu_1 + \nu_3$. Модель основана на использовании выражения¹ для колебательно-вращательной энергии молекулы в виде

$$\frac{E_{VR}}{\hbar} = \sum_i \left[\omega_i V_i + x_{ii} V_i (V_i + d_i) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} x_{ij} V_i (V_j + d_j) \right] + B' J(J+1)$$

Здесь $i=1, \dots, 6$ – номер колебательной моды, $V_i=0, 1, 2, \dots$ – полное число колебательных квантов в соответствующей моде, d_i – её кратность вырождения (для мод $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ она равна 1, 2, 3, 3, 3, 3, соответственно), x_{ij} – коэффициенты ангармонизмов, $B' = B(1 - \zeta_3)$, $B = \hbar^2 / 2I_0$ – вращательный квант молекулы, I_0 – её момент инерции для случая, когда ядра находятся в положениях равновесия, J – полный угловой момент молекулы, $\zeta_3 = 0,18 \pm 0,02$ – параметр, характеризующий эффект кориолисова взаимодействия между вращениями и колебаниями молекулы. Для переходов $V_3=0 \rightarrow V_3=1$ и учитывая разрешённые вращательные переходы $\Delta J = 0, \pm 1$, имеем выражения для частот Q, R, P ветвей спектра ν_3 моды соответственно

$$\omega_P = \omega_Q - 2B(1 - \zeta_3)J, \quad \omega_R = \omega_Q + 2B(1 - \zeta_3)(J + 1)$$

$$\omega_Q = \omega_3 + 4x_{33} + \sum_{j \neq 3} x_{3j}(2V_j + d_j)$$

Из этих формул следует, что наблюдаемая спектральная ширина P и R ветвей определяется главным образом распределением молекул по вращательным состояниям J . Для Q-ветви из-за наличия ангармонизмов частота перехода зависит от значений всех квантовых чисел V_i с $i \neq 3$. Таким образом, спектральная ширина Q-ветви определяется молекулами, находящимися в возбуждённых состояниях, главным образом, низкочастотных мод $i=4, 5, 6$. Этот эффект известен в литературе как

¹ McDowell R.S., Asprey L.B., Paine R.T. Vibrational spectrum and force field of uranium hexafluoride // J. Chem. Phys.-1974.-V. 61.- P.3571-3580

уширение Q-ветви за счёт «горячих переходов» (“hot band transitions”)¹. Помимо этого, каждый «горячий переход» имеет обширную вращательную тонкую структуру. Для определения интенсивностей поглощения в спектральных линиях учитывалось гиббсовское распределение по колебательно-вращательным состояниям молекул. В разделе представлена теория, позволяющая детально рассчитать структуру спектра поглощения гексафторидов в области частот вблизи полос ν_3 и $\nu_1+\nu_3$. Возбуждение ν_3 -моды происходит в первом порядке теории возмущений по взаимодействию дипольного момента молекулы с электрическим полем лазерного луча. Поскольку при колебаниях в ν_1 -моды дипольный момент не возникает, переход $\nu_1+\nu_3$ происходит при поглощении одного лазерного фотона во втором порядке теории возмущений по молекулярным ангармонизмам и дипольному взаимодействию. Конкретные результаты приведены для молекулы UF_6 .

Представление о погрешностях расчёта можно получить из Рис 1 и 2. Основная ошибка возникает из приведённой выше формулы для вращательно-колебательной энергии молекулы E_{VR} , которая плохо описывает уровни энергии с большими колебательными числами.

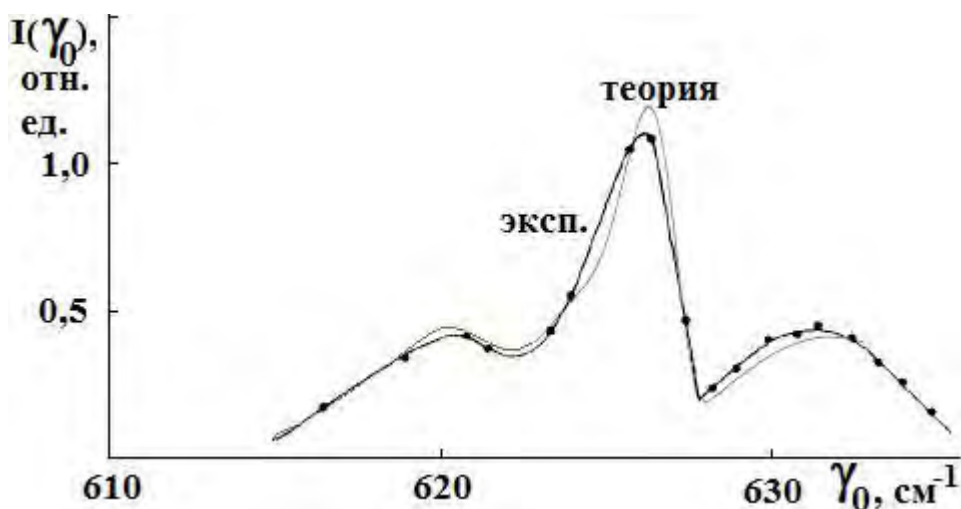


Рис. 1. Сравнение расчёта спектра с измеренным спектром поглощения молекул UF_6 в области частот вблизи полос ν_3 при температуре 300 К.

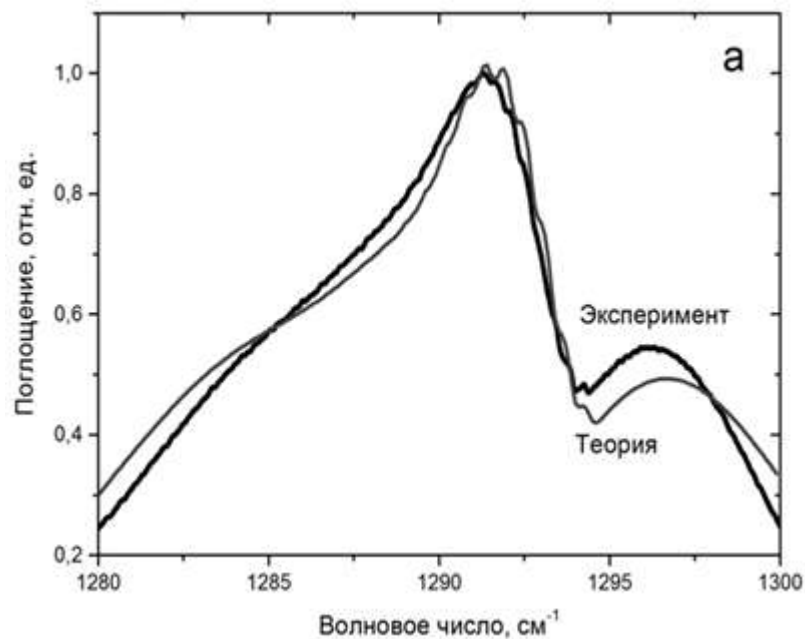


Рис.2. Сравнение рассчитанного спектра поглощения $^{238}\text{UF}_6$ в полосе $\nu_1 + \nu_3$ с экспериментальным спектром, полученным при температуре 300 K с помощью ИК Фурье-спектрометра.

Согласно проведённым в рамках развитой теоретической схемы численным расчётам форма ИК-спектра поглощения существенно зависит от температуры (см. Рис. 3 и 4). Из результатов расчёта, представленных на Рис. 1, следует вывод, что, путём сравнения формы экспериментального спектра с вычисленным, можно бесконтактным образом измерять профиль колебательной температуры молекул гексафторидов, в частности, UF_6 , в быстрорасширяющихся струях с погрешностью ≤ 10 K.

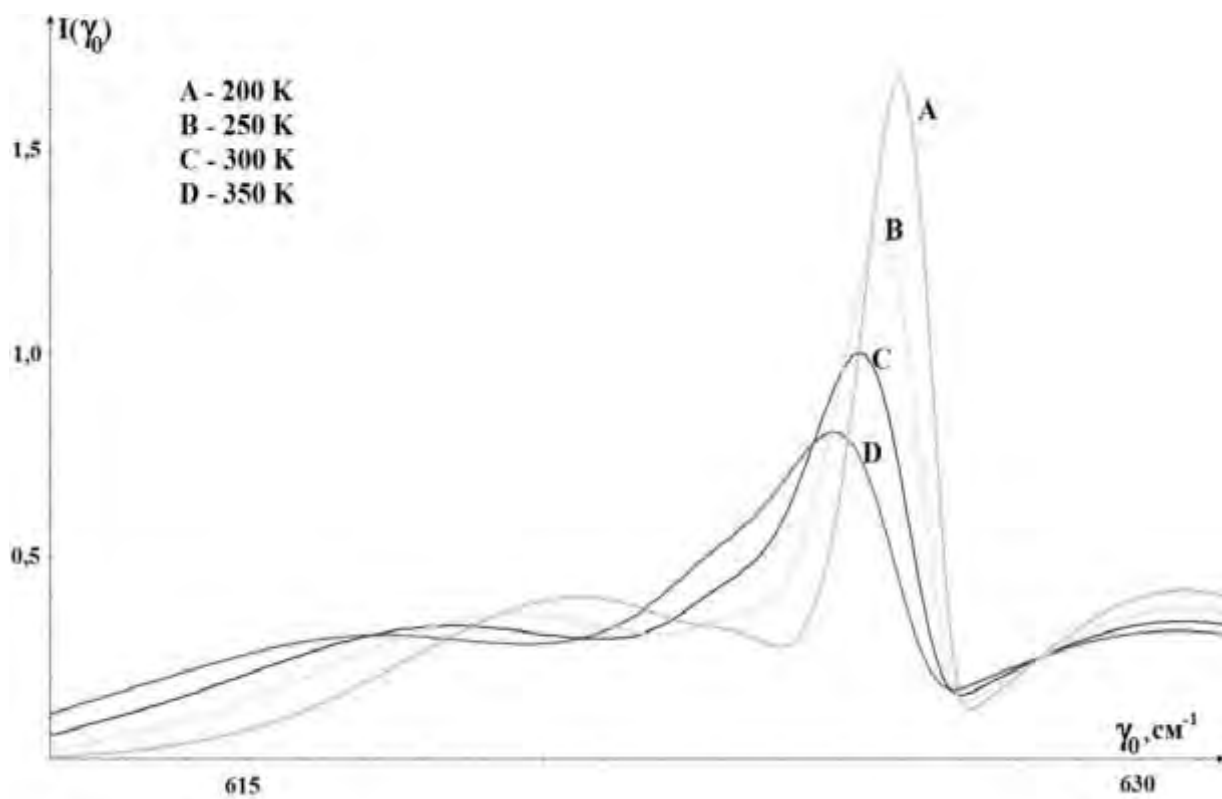


Рис. 3. Теоретическая температурная зависимость ИК-спектра поглощения UF_6 в области полосы ν_3 .

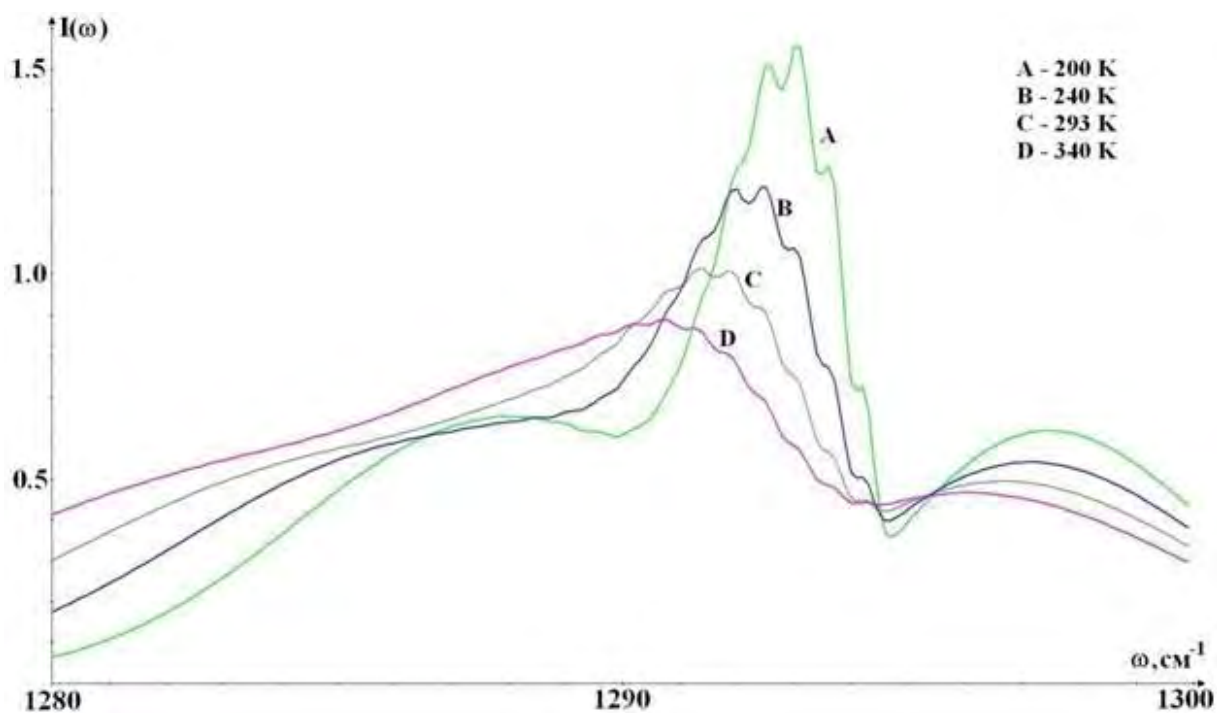


Рис.4. Теоретическая температурная зависимость ИК-спектра поглощения UF_6 в области полосы $\nu_1 + \nu_3$.

В третьей главе обсуждается эффект пороговой зависимости степени колебательного возбуждения многоатомной молекулы от интенсивности (то есть от плотности потока электромагнитной энергии в луче) лазерного излучения, с частотой, близкой к резонансу с одной из оптически активных колебательных мод молекулы (далее-пороговый по интенсивности эффект). Для этого в диссертации рассматривается движение слабоангармонического квантово-механического осциллятора со слабым затуханием, на который действует осциллирующая внешняя сила с медленно меняющейся амплитудой и частотой. В случае многоатомной молекулы затухание вызвано обменом энергией с другими колебательными модами, обусловленным межмодовым ангармонизмом. Показано, что состояние такого осциллятора, находившегося вначале (при $t \rightarrow -\infty$, когда лазер выключен) в основном состоянии, приближённо является когерентным. Последнее характеризуется средними значениями координаты и импульса, подчиняющимися уравнению движения классического осциллятора со слабым затуханием и ангармонизмом.

Классический гармонический осциллятор с затуханием характеризуется лоренцевой амплитудо-частотной характеристикой (АЧХ). В случае малых колебаний АЧХ ангармонического осциллятора также почти совпадает с лоренцевой кривой, однако при повышении амплитуды лазерного излучения (вынуждающей силы) лоренцев «купол» асимптотически вытягивается вдоль наклонной прямой в сторону низких частот, как это показано на Рис.5.

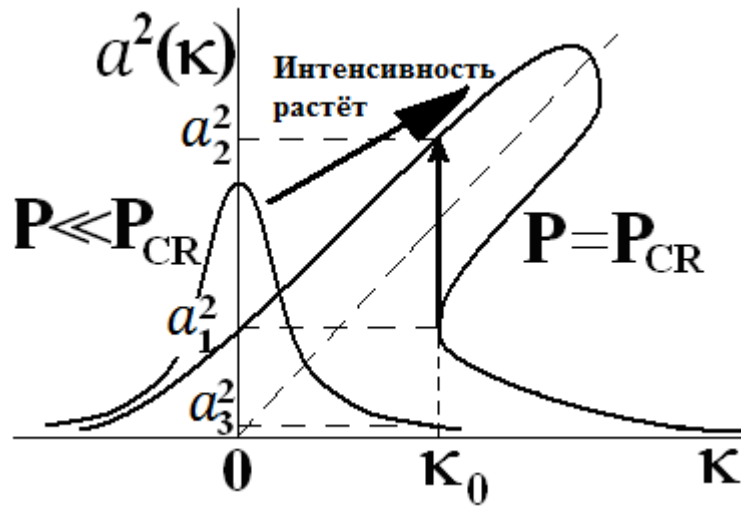


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика ангармонического осциллятора с затуханием.

В таком случае одному значению частоты вынуждающей силы может одновременно соответствовать три значения амплитуды колебаний осциллятора, причём в лишь два из них являются устойчивыми. На графике АЧХ имеются две точки, где производная амплитуды по частоте равна бесконечности (в данных точках касательная к графику вертикальна). Данные точки соответствуют скачкообразному уменьшению или увеличению амплитуды при плавном изменении частоты, либо амплитуды вынуждающей силы (при изменении амплитуды плавно изменяется вся АЧХ). Этот бифуркационный, пороговый по интенсивности лазера P эффект возникает из-за потери устойчивости колебаний при $P=P_{CR}$ скачкообразном переходе в другое устойчивое состояние. Показано, что ключевую роль в этом процессе играет диссипация, вызванная ангармоническим взаимодействием с другими модами многоатомной молекулы, играющими роль термостата.

Полученное уравнение движения нелинейного осциллятора с затуханием и внешней силой решались методом Боголюбова-Крылова-Митропольского. Получена система уравнений для медленно меняющихся амплитуды и фазы колебаний осциллятора. Её численное решение позволило описать эволюцию этих величин во времени при медленном

изменении амплитуды вынуждающей силы, либо её частоты. Пример расчёта приведён на Рис.6. На рисунке явно виден пороговый по интенсивности эффект, когда при определённой пороговой величине вынуждающей силы происходит увеличение энергии колебаний на порядок и более. В случае лазерного колебательного возбуждения молекул это означает резкое увеличение эффективности закачки энергии лазера в колебательные степени свободы молекулы, что следует учитывать при разработке методов низкоэнергетического селективного лазерного разделения изотопов. Обсуждается также ряд других свойств рассматриваемого явления, например, гистерезис, возникающий при включении и выключении лазерного импульса.

Указаны условия опытов, в которых можно проверить пороговый по интенсивности эффект: зона $30\text{K} < T < 50\text{K}$ расширяющейся сверхзвуковой струи $\text{Ar} (>99\%) + \text{UF}_6 (< 1\%)$. Обсуждаются имеющиеся к настоящему времени экспериментальные результаты при комнатной температуре, косвенным образом подтверждающие эффект: 1) смещение максимума спектра поглощения многоатомных молекул в область низких частот и эффект появления двух групп молекул: со слабым и значительным колебательным возбуждением.

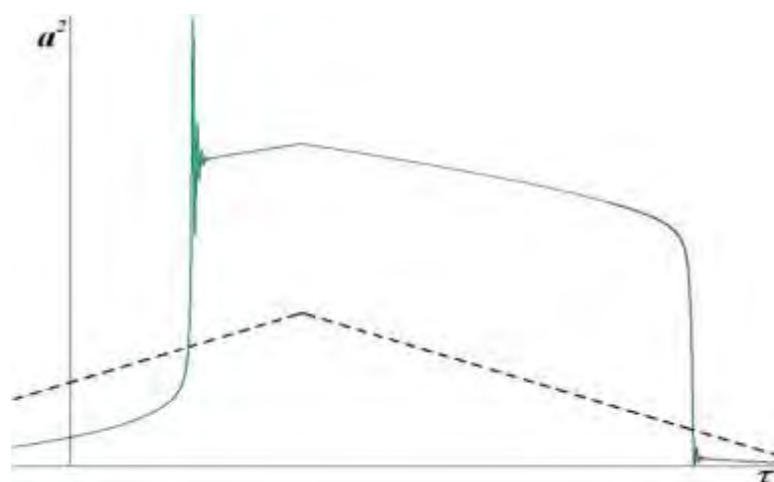


Рис. 6. Расчёт зависимости амплитуды колебаний в зависимости от времени для лазерного импульса в форме равнобедренного треугольника. Пунктиром обозначен профиль амплитуды импульса лазера во времени, сплошная линия - соответствующая данному моменту времени амплитуда колебаний осциллятора.

В главе представлены также разделы, имеющие вспомогательный характер, в которые вынесены детали математических расчётов:

- 1) феноменологическая модель порогового эффекта, раскрывающая его физический смысл и позволяющая также интерпретировать указанный выше эффект появления двух групп молекул;
- 2) раздел, посвящённый описанию движения осциллятора, возбуждаемого внешней силой, на языке когерентных состояний;
- 3) раздел, посвящённый описанию движения осциллятора, связанного с множеством осцилляторов, в котором с применением методов Глаубера-Зельдовича-Переломова-Попова корректным образом в описание движения квантово-механического осциллятора вводится трение;
- 4) раздел с математическим дополнением к методу Боголюбова-Крылова-Митропольского.

Приведенные в предыдущих главах подходы к анализу поведения молекул в сверхзвуковых потоках могут быть использованы и для рассмотрения возможного разделения не молекул и кластеров, а разделение примерно равных по летучести, но отличающихся по массе соединений. Эта задача, представляющая интерес для разработки технологий получения высокочистых веществ, рассмотрена в **четвёртой главе**. Для определенности здесь анализируется проблема очистки циркония от гафния, являющаяся крайне важной задачей в атомной энергетике. Конкретно, рассматривается нестационарный центробежный эффект разделения смесей газов в искривленных каналах. Классический метод разделения в центрифугах основан на стационарном больцмановском распределении газа, устанавливаемом в результате действия центробежных сил. Однако в том случае, когда смесь газов или изотопов выпускается из отверстия в искривленный канал, для установления больцмановского распределения под действием сил ускорения требуется некоторый промежуток времени (или, что то же самое, некоторый пройденный путь вдоль оси канала). Оказывается, что на переходном

участке достигается коэффициент обогащения, на порядок больший по сравнению со стационарным случаем. Происходит это потому, что на переходном участке более тяжёлый газ под действием ускорения первым достигает своего стационарного распределения, в то время как лёгкому газу требуется для этого большее время. После достижения тяжёлым газом своего стационарного распределения, достигается наивысшая степень разделения газов. В последующие моменты лёгкий газ приближается к стенке и разбавляет тяжёлый, в результате чего степень разделения понижается, как это показано на Рис. 7. Для увеличения степени разделения требуется применять лёгкий газ-носитель с высоким значением показателя адиабаты, что требуется для достижения низкой температуры в струе. Уравнения диффузии обоих газов в газе-носителе решались по методу Фурье с применением численных расчётов, в которые и позволили выявить эффект.

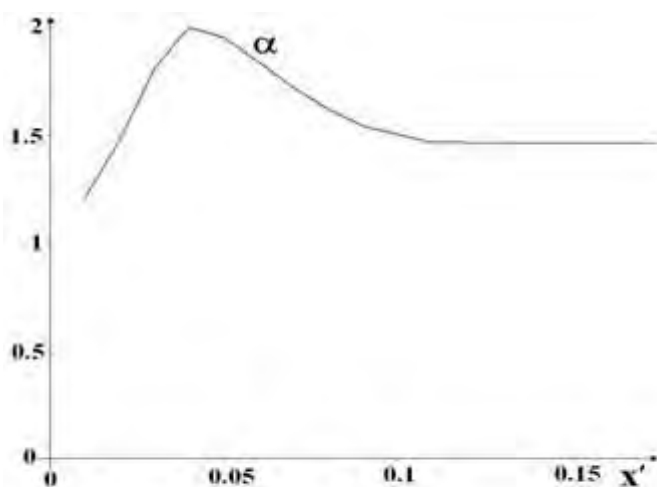


Рис. 8. Пример зависимости коэффициента разделения α от безразмерной координаты (определение дано в диссертации) вдоль канала, заключённого между коаксиальными цилиндрами. Координата отсчитана от щелевидного сопла, из которого газовая смесь поступает в канал в виде расширяющейся сверхзвуковой струи. Наблюдается максимум для нестационарного центробежного разделения на переходном участке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1) Предложена модель расчёта формы колебательно-вращательных ИК спектров поглощения молекул гексафторидов при разных температурах. Предложенная модель позволяет определять колебательную температуру молекул по форме спектра с погрешностью ≤ 10 К.

2) Разработана модель резонансного низкоэнергетического лазерного возбуждения колебаний многоатомной молекулы с учётом ангармонизма резонансной моды, а также эффектов передачи энергии в другие моды колебаний. Обнаружен пороговый по интенсивности лазера эффект возбуждения молекулярных колебаний.

3) Обнаружен эффект резкого увеличения центробежного разделения газовой смеси в струе, движущейся в искривленном канале, в начальном неравновесном режиме, когда бальцмановское распределение концентраций газов ещё не установилось.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи

1. Григорьев Г.Ю., Максимычев А.В., Меньшиков Л.И., **Меньшиков П.Л.** Эффект резкого увеличения коэффициента центробежного разделения газовых смесей в неравновесных условиях // Труды МФТИ.-2016.-Т.8.-№1.-С.163.
2. Григорьев Г.Ю., Максимычев А.В., Меньшиков Л.И., **Меньшиков П.Л.** О механизмах разделения изотопов в сверхзвуковых потоках // Труды МФТИ.-2016.-Т.8.-№3.-С.142-156.

Тезисы конференций

1. Ш.Ш. Набиев, Д.Б. Ставровский, В.М.Семенов, **П.Л. Меньшиков**, Л.И. Меньшиков, Я.Я. Понуровский, Г.Ю. Григорьев. Тонкая структура спектров поглощения Q-ветви полосы $\nu_1+\nu_3$ UF_6 : исследование с помощью перестраиваемого ККЛ и ИК Фурье-спектроскопии // XVIII Международный симпозиум и школ молодых учёных “Молекулярная спектроскопия высокого разрешения” (HighRus-2015), 30 июня - 04 июля 2015 г., г. Томск, Россия. Report C27.
2. Ш.Ш. Набиев, **П.Л. Меньшиков**, В.М. Семенов. Структура ИК спектра поглощения составного колебания $\nu_1+\nu_3$ молекулы UF_6 . XIII Курчатовская молодёжная научная школа. Москва. Россия. 27-30 октября 2015, тезисы докладов.
3. Ш.Ш. Набиев, Д.Б. Ставровский, В.М.Семенов, **П.Л. Меньшиков**, Л.И. Меньшиков, Я.Я. Понуровский, Г.Ю. Григорьев. Исследования спектров поглощения $^{238}UF_6$ и $^{235}UF_6$ в полосе $\nu_1+\nu_3$ с помощью квантового каскадного лазера (ККЛ): тонкая структура Q-ветви и измерения степени обогащения. 10th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy TDLS-2015 July 6 - 10, 2015 Moscow, Russia. Abstracts of Papers.-P.25
4. Григорьев Г.Ю., **Меньшиков П.Л.**, Набиев Ш.Ш. Пороговая зависимость колебательного возбуждения многоатомных молекул от интенсивности лазерного излучения // XXV Съезд по спектроскопии, Москва-Троицк, 3 - 7 октября 2016 г., тезисы докладов

5. Набиев Ш.Ш., Ставровский Д.Б., Семенов В.М., **Меньшиков П.Л.**, Меньшиков Л.И., Понуровский Я.Я., Григорьев Г.Ю. Тонкая структура спектра ИК поглощения Q-ветви полосы $\nu_1+\nu_3$ UF_6 // XXV съезд по спектроскопии, Москва-Троицк, 3 - 7 октября 2016 г., тезисы докладов.