

О РАСЧЕТЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ  
КОЛЕБАТЕЛЬНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО  
И КОЛЕБАТЕЛЬНО-КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ОБМЕНОВ  
МЕЖДУ ИЗОТОПНЫМИ МОДИФИКАЦИЯМИ МОЛЕКУЛ АЗОТА  
ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*В. М. Акулинцев, Н. М. Горшунев, Ю. П. Нецименко*

(Москва)

В последнее время появился ряд теоретических и экспериментальных работ, посвященных вопросам разделения изотопов в химических реакциях, протекающих в термодинамически неравновесных условиях [1—5]. При этом рабочий газ обычно находится при низкой поступательной температуре ( $\lesssim 300$  К). Для теоретических расчетов необходимо знание вероятностей колебательно-колебательного ( $V-V$ ) и колебательно-поступательного ( $V-T$ ) обменов между молекулами рабочего газа.

К сожалению, экспериментальных данных по вероятности  $V-T$ - и  $V-V$ -обменов при температуре  $\lesssim 300$  К чрезвычайно мало, и они охватывают ограниченный круг молекул [6—8], а по молекулам азота экспериментальные данные по  $V-V$ -обмену вообще отсутствуют.

Цель данной работы — расчет вероятностей  $V-V$ - и  $V-T$ -обменов между изотопными модификациями молекул азота. Указанному расчету предшествовали поиск и выбор наиболее подходящих методов вычисления вероятностей  $V-T$ - и  $V-V$ -обменов, которые имеются в литературе. Кроме того, вычислены вероятности  $V-T$ -обмена еще для нескольких пар молекул.

1. Расчет вероятности  $P_{10}(T)$  колебательно-поступательного обмена проводился в рамках квазиклассического приближения, предложенного в [9, 10] и дающего удовлетворительное совпадение с экспериментом в диапазоне температур 150—300 К для процесса  $\text{CO}(V=1) + \text{He} = \text{CO}(V=0) + \text{He} + 0,2657$  эВ. Величина  $P_{10}(T)$  вычислялась так же, как в [10], по формуле

$$(1.1) \quad P_{10}(T) = \frac{1}{kT} \int_0^{\infty} P_{10}(E) e^{-\frac{E}{kT}} dE.$$

Интегрирование проводилось при помощи квадратурной формулы Лаггера [11] с точностью 0,001%. Потенциал Морзе записывался в виде [12]

$$U(r) = D \{e^{-r/L} - 2e^{-r/2L}\}.$$

Значения глубины потенциалов ямы  $D$  взяты из работы [12]. Для сравнения с экспериментальными данными величины вероятностей  $P_{10}(T)$  пересчитывались в характерные времена релаксации  $\rho\tau$  [13].

Параметр потенциала Морзе  $L$  подбирался так, чтобы в диапазоне температур 1000—5000 К наклон линейного участка графика зависимости логарифма теоретически рассчитанных величин  $\rho\tau$  от  $T^{-1/3}$  совпадал

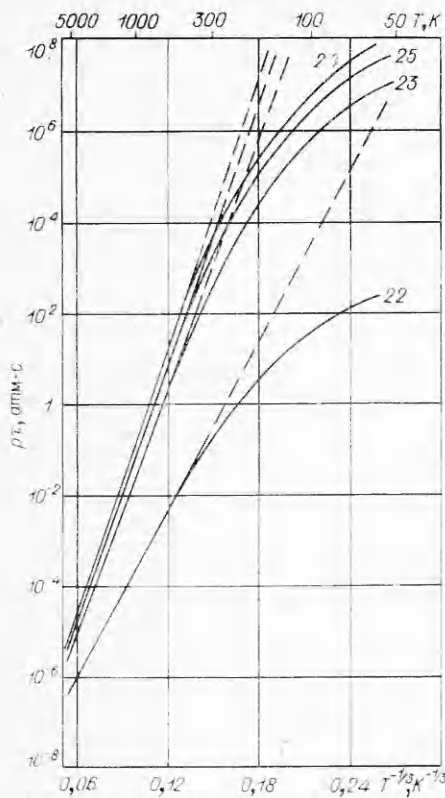
№ п/п	Процесс	$D \cdot 10^{12}$ , эрг	$\sigma$ , Å	$L$ , Å	$Z^{-1}$	$a_0$	$a_1$
1	$N_2(V=1) + N_2(V=0) =$ $= N_2(V=0) + N_2(V=1)$	0,0126	3,681	—	3	-8,25649	-18,6955
2	$N^{14}N^{14}(V=1) + N^{14}N^{14}(V=0) =$ $= N^{14}N^{14}(V=0) + N^{14}N^{14}(V=$ $= 1)$	0,0126	3,681	—	3	-8,25690	-18,6953
3	$N^{14}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{15}(V=$ $= 0) = N^{14}N^{15}(V=0) + N^{14}N^{15}$ $(V=1)$	0,0126	3,681	—	3	-8,25382	-18,6944
4	$N^{15}N^{15}(V=1) + N^{15}N^{15}(V=$ $= 0) + N^{15}N^{15}(V=0) +$ $+ N^{15}N^{15}(V=1)$	0,0126	3,681	—	3	-8,25778	-18,6948
5	$N^{15}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{14}(V=$ $= 0) = N^{15}N^{15}(V=0) +$ $+ N^{14}N^{14}(V=1)$	0,0126	3,681	—	3	-13,7455	48,5610
6	$N^{14}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{15}(V=$ $= 0) = N^{15}N^{15}(V=0) +$ $+ N^{14}N^{15}(V=1)$	0,0126	3,681	—	3	-10,7445	14,0336
7	$N^{14}N^{14}(V=1) + N^{14}N^{15}(V=$ $= 0) = N^{14}N^{14}(V=0) +$ $+ N^{14}N^{15}(V=1)$	0,0126	3,681	—	3	-8,71106	-15,3925
8	$N_2(V=1) + N_2 = N_2(V=0) +$ $+ N_2$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,1901	73,6029
9	$N^{14}N^{14}(V=1) + N^{14}N^{14} =$ $= N^{14}N^{14}(V=0) + N^{14}N^{14}$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,1911	73,5480
10	$N^{14}N^{14}(V=1) + N^{14}N^{15} =$ $= N^{14}N^{14}(V=0) + N^{14}N^{15}$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,6689	76,0095
11	$N^{14}N^{14}(V=1) + N^{15}N^{15} =$ $= N^{14}N^{14}(V=0) + N^{15}N^{15}$	0,0126	—	4,11	0,272	-45,1040	13,9976
12	$N^{14}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{14} =$ $= N^{14}N^{15}(V=0) + N^{14}N^{14}$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,1402	75,5270
13	$N^{14}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{15} =$ $= N^{14}N^{15}(V=0) + N^{14}N^{15}$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,6261	78,0743
14	$N^{14}N^{15}(V=1) + N^{15}N^{15} =$ $= N^{14}N^{15}(V=0) + N^{15}N^{15}$	0,0126	—	4,11	0,272	-45,7812	38,8139
15	$N^{15}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{14} =$ $= N^{15}N^{15}(V=0) + N^{14}N^{14}$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,0461	77,3754
16	$N^{15}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{15} =$ $= N^{15}N^{15}(V=0) + N^{14}N^{15}$	0,0126	—	4,11	0,272	-46,5393	80,0034
17	$N^{15}N^{15}(V=1) + N^{15}N^{15} =$ $= N^{15}N^{15}(V=0) + N^{15}N^{15}$	0,0126	—	4,11	0,272	-47,0131	82,5649
18	$N_2(V=1) + Ar = N_2(V=0) +$ $+ Ar$	0,0147	—	2,1	0,276	-51,2403	134,277
19	$N^{14}N^{14}(V=1) + Ar =$ $= N^{14}N^{14}(V=0) + Ar$	0,0147	—	2,1	0,276	-51,2479	134,259
20	$N^{14}N^{15}(V=1) + Ar =$ $= N^{14}N^{15}(V=0) + Ar$	0,0147	—	2,1	0,276	-51,2653	136,566
21	$N^{15}N^{15}(V=1) + Ar =$ $= N^{15}N^{15}(V=0) + Ar$	0,0147	—	2,1	0,276	-51,2304	138,653
22	$O_2(V=1) + Ar = O_2(V=0) +$ $+ Ar$	0,0164	—	6,06	0,248	-34,6386	79,5392
23	$CO(V=1) + Ar = CO(V=0) +$ $+ Ar$	0,0163	—	2,19	0,272	-46,5090	114,183
24	$N_2(V=1) + O_2 = N_2(V=0) +$ $+ O_2$	0,0140	—	1,75	0,285	-50,2947	131,470
25	$N_2(V=1) + CO = N_2(V=0) +$ $+ CO$	0,0139	—	2,26	0,284	-48,7392	122,761

с наклоном прямой, аппроксимирующей экспериментально измеренные величины  $\lg(p\tau)$ . Стерический фактор  $Z$  брался таким, чтобы получить согласие между теоретическими и экспериментальными величинами  $p\tau$  в области температур 4000—5000 К. Величина  $L$  полагалась одной и той же для всех изотопных модификаций молекул азота. Полученные значе-

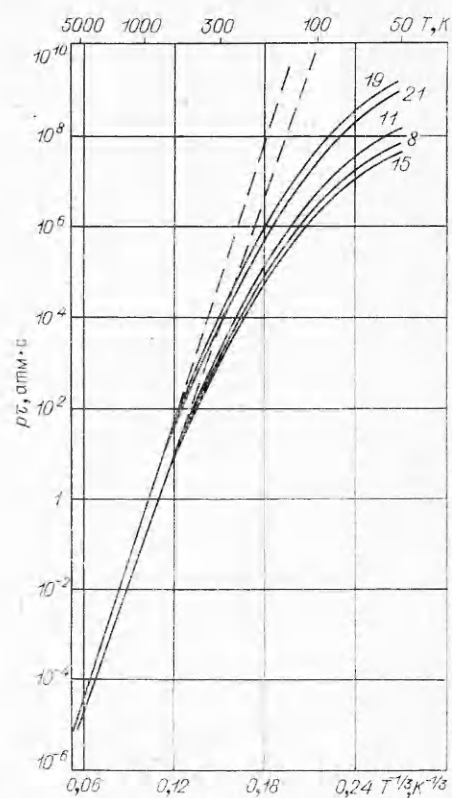
$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
208,670	-1116,85	3627,53	-7397,50	9251,35	-6484,60	1950,54
208,678	-1116,84	3627,50	-7397,43	9251,27	-6484,55	1950,53
208,672	-1116,82	3627,44	-7397,31	9251,14	-6484,46	1950,50
208,675	-1116,83	3627,46	-7397,36	9251,18	-6484,48	1950,51
-300,172	1310,11	-3828,51	7321,93	-8774,22	5967,57	-1755,57
-44,7163	104,181	-143,918	71,4970	86,3041	-144,668	617,600
191,388	-1053,97	3471,00	-7136,44	8972,93	-6313,17	1904,23
266,121	-3592,21	17031,0	-44996,0	69258,3	-58039,2	20479,0
266,589	-3594,63	17039,0	-45013,2	69281,3	-58056,6	20484,7
253,620	-3547,09	16924,3	-44838,2	69123,7	-57985,2	20474,3
1079,85	-9375,06	41189,0	-106383	162551	-135973	47995,1
249,194	-3503,96	16734,5	-44353,2	6839,09	-57377,9	20261,7
235,468	-3452,10	16604,1	-44141,4	68180,8	-57264,5	20237,0
765,399	-7207,62	32270,5	-83920,3	128606	-107727	38049,9
232,031	-3412,06	16420,1	-43661,6	67447,1	-56651,8	20021,3
217,584	-3356,06	16274,4	-43414,4	67186,3	-56497,8	19982,8
203,206	-3298,84	16120,5	-43142,3	66884,0	-56307,2*	19930,9
-387,369	740,593	-577,864	-814,846	2538,29	-2485,03	896,750
-387,156	739,485	-574,383	-821,757	2546,46	-2490,96	898,481
-404,939	822,150	-821,948	-343,024	1969,92	-2097,45	782,571
-421,633	900,736	-1058,82	116,824	1414,42	-1717,88	670,591
-141,523	-138,106	-1669,19	-4724,78	6907,55	-5302,28	1691,63
-274,074	267,277	-773,518	-3363,61	5564,94	-4530,53	1495,73
-376,470	709,510	-517,403	-891,333	2596,69	-2508,10	899,813
-329,854	526,573	-22,0256	-1787,13	3625,77	-3185,53	1094,04

ния логарифмов вероятностей  $P_{10}(T)$  аппроксимировались полиномом по способу наименьших квадратов

$$(1.2) \quad \ln [P_{10}(T)] = \sum_{i=1}^N a_i (T \cdot 10^{-3})^i.$$



Фиг. 1



Фиг. 2

Точность аппроксимации 0,001%. Значения  $D$ ,  $L$ ,  $Z$  и  $a_i$  приведены в таблице. На фиг. 1 показана температурная зависимость  $\lg(P\tau)$  для различных пар комбинаций молекул  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$ . Штриховые линии соответствуют экстраполяции высокотемпературных экспериментальных данных в область низких температур по закону  $\sim T^{-1/3}$  [14]. Цифры на кривых указывают порядковый номер соответствующего процесса в таблице. Как видно из фиг. 1, при  $T < 500$  К наблюдается отклонение от зависимости Ландау — Теллера, достигающее для температуры  $T = 100$  К двух-трех порядков в зависимости от пары молекул. Согласно данным экспериментов [6], приближение Ландау — Теллера при низких температурах не выполняется.

На фиг. 2 показана температурная зависимость  $\lg(P\tau)$  для различных изотопных модификаций молекул азота, а также для изотопных модификаций молекул азота и аргона.

2. В основу расчета вероятностей  $P_{10}^{01}(T)$  колебательно-колебательного обмена между изотопными модификациями молекул азота была положена теория, развитая в работах [15, 16]. Однако в методику вычислений внесены некоторые изменения. Величина вероятности  $V$  —  $V$ -обмена определялась по формуле

$$(2.1) \quad P_{10}^{01}(T) = \frac{1}{2} Z \exp(D/kT) \exp(-\hbar(\omega_1 - \omega_2)/2kT) \times \\ \times \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{1}{4} \int_0^{\infty} \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{2M}{kT\beta}} (\omega_1 - \omega_2) L \right\} \sin \left\{ \sqrt{\frac{2kTM}{\omega_1 \omega_2 \mu_1 \mu_2}} \frac{\gamma_i \gamma_j}{L} \sqrt{\beta} \right\} e^{-\beta} d\beta,$$

где  $\beta = Mv^2/2kT$ ;  $\gamma_1 = m_A/(m_A + m_B)$ ;  $\gamma_2 = m_B/(m_A + m_B)$ ;  $\gamma_3 = m_C/(m_C + m_D)$ ;  $\gamma_4 = m_D/(m_C + m_D)$ ,  $\omega$  — частота перехода;  $\mu$  — приведенная масса осциллятора;  $M$  — приведенная масса сталкивающихся молекул;  $v$  — скорость относительного поступательного движения молекул;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $m$  — масса соответствующего атома в молекуле. Индексы 1 и 2 относятся соответственно к молекулам  $AB$  и  $CD$ , участвующим в процессе.

$$AB(V=1) + CD(V=0) = AB(V=0) + CD(V=1) + \hbar(\omega_1 - \omega_2).$$

Множитель  $\exp(D/kT)$  приближенно учитывает притяжение молекул [17], коэффициент  $1/2$  появляется из-за усреднения по прицельному параметру столкновения молекул  $AB$  и  $CD$  [18], множитель  $\exp[-\hbar(\omega_1 - \omega_2)/2kT]$  введен для симметризации формулы вероятности по конечным и начальным скоростям сталкивающихся молекул [19]. Двойное суммирование проводится для усреднения по столкновениям  $AB - CD$ ,  $AB - DC$ ,  $BA - CD$ ,  $BA - DC$ .

В формуле (2.1) аргумент синуса записывается в более общем, чем в [16], виде, пригодном для разных молекул.

Параметр  $L$  в потенциале взаимодействия  $U(r) = Ae^{-r/L} - D$  определяется при помощи параметра  $\sigma$  потенциала Ленарда — Джонса по методу А [13]. Значения  $\sigma$ , приведенные в таблице, брались из работы [12]. Стерический фактор  $Z$  при расчетах полагался равным  $1/3$ .

Значение интеграла (2.1) не заменялось приближенной аналитической формулой, как в [16], а определялось численным интегрированием с точностью  $0,001\%$ .

На фиг. 3 приведены результаты расчета по формуле (2.1) вероятности  $P_{10}^{01}(T)$  обмена для процесса  $N_2(V=1) + CO(V=0) = N_2(V=0) + CO(V=1) + 0,0231$  эВ. Здесь же приведены известные экспериментальные данные. Точками нанесены результаты экспериментов, приведенные в работе [7], крестиками — в работе [20], горизонтальными линиями заштрихована область, где находятся экспериментальные значения работы [21], вертикальными линиями — работы [22].

Согласие с экспериментальными данными в области низких температур весьма хорошее. В области же высоких температур разброс между опубликованными экспериментальными данными достигает почти порядка, и наши результаты лучше всего совпадают с результатами работы [22].

По формуле (2.1) были также просчитаны вероятности обмена для процессов

$$N_2(V=1) + O_2(V=0) = N_2(V=0) + O_2(V=1) + 0,0958 \text{ эВ},$$

$$CO(V=1) + O_2(V=0) = CO(V=0) + O_2(V=1) + 0,0728 \text{ эВ}$$

и обнаружено хорошее согласие с экспериментами.

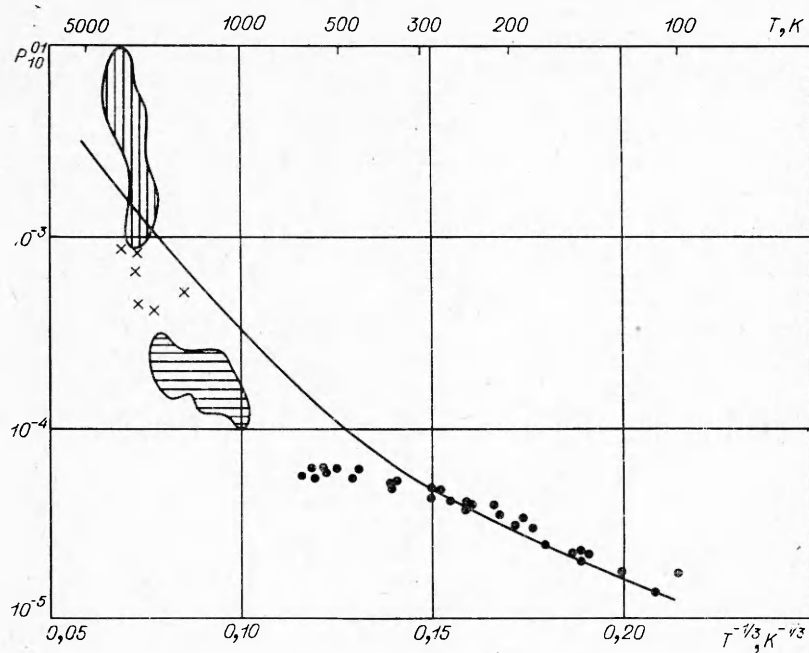
Это дает основание полагать, что и в случае  $V - V$ -обмена между молекулами азота, для которых совершенно отсутствуют экспериментальные данные, результаты расчета по формуле (2.1) будут близки к истинным величинам вероятностей.

На фиг. 4 сплошными линиями показана температурная зависимость вероятностей  $P_{10}^{01}(T)$  для изотопных модификаций молекул азота, штриховая линия — результат расчета по формуле (2) работы [16] для процесса

$$N_2(V=1) + N_2(V=0) = N_2(V=0) + N_2(V=1)$$

со стерическим фактором  $Z = 1/3$ .

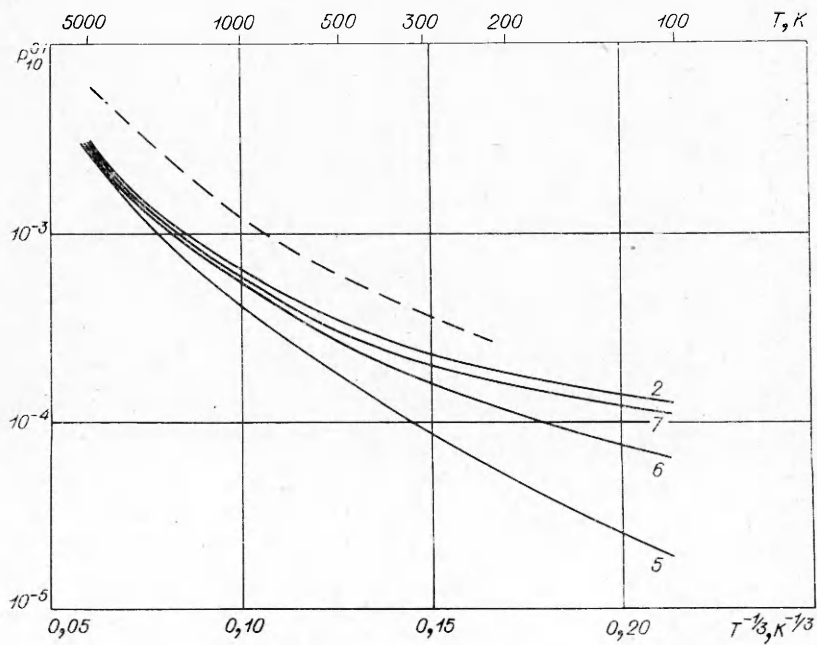
Как следует из фиг. 4, в случае резонансного колебательно-колебательного обмена  $P_{10}^{01}(T)$  практически одинаковы для всех трех изотопных



Ф и г. 3

модификаций молекул азота, с увеличением же изотопного сдвига вероятности квазирезонансного  $V - V$ -обмена уменьшаются, причем различие между ними становится более заметным с уменьшением температуры.

3. На основании приведенных результатов можно сделать вывод о том, что массовое число оказывает существенное влияние на величины



Ф и г. 4

вероятностей колебательно-колебательного и колебательно-поступательного обменов.

В расчетах получено, что отличие между вероятностями при температуре  $T = 100$  К для процессов

$$(3.1) \quad N^{14}N^{14}(V=1) + N^{15}N^{15} = N^{14}N^{14}(V=0) + N^{15}N^{15} + 0,289 \text{ эВ};$$

$$(3.2) \quad N^{15}N^{15}(V=1) + N^{14}N^{14} = N^{15}N^{15}(V=0) + N^{14}N^{14} + 0,279 \text{ эВ}$$

равно 51 %, а для процессов

$$(3.3) \quad N^{14}N^{14}(V=1) + \text{Ar} = N^{14}N^{14}(V=0) + \text{Ar} + 0,289 \text{ эВ};$$

$$(3.4) \quad N^{15}N^{15}(V=1) + \text{Ar} = N^{15}N^{15}(V=0) + \text{Ar} + 0,279 \text{ эВ}$$

составляет 15 %.

Такое различие связано с тем, что энергия осциллятора  $N^{14}N^{14}$  больше, чем  $N^{15}N^{15}$ , а масса атома аргона больше, чем  $N^{14}N^{14}$  или  $N^{15}N^{15}$ . Указанная тенденция уменьшения вероятности обмена при уменьшении энергии осциллятора и массы налетающей молекулы выявлена также и в работе [23], где проведен анализ экспериментальных данных о характерных временах колебательно-поступательной релаксации для целого ряда молекул.

С увеличением температуры отличия в вероятностях становятся меньше и при  $T = 3000$  К для процессов (3.1), (3.2) и (3.3), (3.4) соответственно равны 24 и 9 %.

В случае  $V - V$ -обмена для изотопных модификаций молекул азота получено, что максимальное отличие в вероятностях наблюдается для процессов 2 и 5 (см. таблицу), где дефект энергии максимален, и при  $T = 100$  К составляет 82 %.

Большее по сравнению с  $V - T$ -обменом отличие в вероятности обусловлено тем, что при увеличении дефекта энергии, т. е. при удалении системы от резонанса, вероятность  $V - V$ -обмена резко уменьшается по экспоненциальному закону [14].

Как отмечается в ряде работ (см., например, [24]), при низких температурах значительный вклад в вероятность  $V - V$ -обмена может давать мультипольное взаимодействие. В работе [18] рассчитаны вероятности  $V - V$ -обмена для молекул CO с учетом диполь-дипольного взаимодействия. Показано, что учет этого взаимодействия приводит к увеличению вероятности и влияние более слабого диполь-квадрупольного взаимодействия мало. Это дает основание полагать, что относительно слабое квадруполь-квадрупольное взаимодействие несущественно изменит результаты расчета, так как молекула  $N_2$  не имеет постоянного дипольного момента.

Результаты данной работы позволяют перейти к численному расчету процессов разделения изотопов азота в химических реакциях, протекающих в термодинамически неравновесных условиях при низкой поступательной температуре. К настоящему времени из литературы известны примеры подобных расчетов [4, 5], которые проводились без учета различия в величинах вероятностей  $V - T$ -обмена для различных изотопных модификаций азота.

Однако указанная выше разница в вероятностях  $V - T$ -обмена может, по-видимому, повлиять на величину коэффициента разделения, рассчитанного, например, в работе [5]. Так, для процессов

$$(3.5) \quad N^{14}N^{14}(V=10) + \text{Ar} = N^{14}N^{14}(V=9) + \text{Ar} + 0,257 \text{ эВ};$$

$$(3.6) \quad N^{15}N^{15}(V=10) + \text{Ar} = N^{15}N^{15}(V=9) + \text{Ar} + 0,243 \text{ эВ}$$

отношение величины вероятности  $P_{10,9}(T)$  процесса (3.6) к аналогичной вероятности процесса (3.5) равно примерно 3—4 и увеличивается с номером уровня, что может привести к обеднению верхних колебательных уровней тяжелого изотопа.

Авторы выражают благодарность Е. Е. Никитину, С. Я. Уманскому и Е. А. Андрееву за полезные обсуждения.

Поступила 1 IX 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Беленов Э. М., Маркин Е. П., Ораевский А. Н., Романенко В. И. О разделении изотопов лазерным излучением инфракрасного диапазона.— «Письма в ЖЭТФ», 1973, т. 18, вып. 3.
2. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Гаврилина Л. К., Исаков В. А., Маркин Е. П., Ораевский А. Н., Романенко В. И., Ферапонтов Н. Б. Разделение изотопов в химических реакциях, протекающих в термодинамических неравновесных условиях.— «Письма в ЖЭТФ», 1974, т. 19, вып. 6.
3. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Гаврилина Л. К., Исаков В. А., Маркин Е. П., Ораевский А. Н., Романенко В. И., Ферапонтов Н. Б. Разделение изотопов в лазерно-стимулированных химических реакциях.— «Письма в ЖЭТФ», 1974, т. 20, вып. 9.
4. Гордиев Б. Ф., Мамедов Ш. С. О разделении изотопов в химических реакциях колебательно-возбужденных молекул.— «Квант. электроника», 1975, т. 2, № 9.
5. Беленов Э. М., Исаков В. А., Маркин Е. П., Ораевский А. Н., Романенко В. И. О разделении изотопов в химических реакциях, протекающих в термодинамически неравновесных условиях.— ЖЭТФ, 1975, т. 45, № 9.
6. Miller D. J., Millican R. C. Vibrational-vibrational energy exchange between carbon monoxide and carbon dioxide.— «J. Chem. Phys.», 1970, vol. 53, N 11.
7. Starr D. F., Hancock J. K., Green W. H. Vibrational deactivation of carbon monoxide by hydrogen and nitrogen from 100 to 650 K.— «J. Chem. Phys.», 1974, vol. 61, N 12.
8. Stephenson J. C., Mosburg E. R. Vibrational energy transfer in CO from 100 to 300 K.— «J. Chem. Phys.», 1974, vol. 60, N 9.
9. Shin H. K. Vibrational relaxation in CO — He at low temperatures.— «J. Chem. Phys.», 1971, vol. 55, N 11.
10. Shin H. K. Temperature dependence of vibrational transition probabilities for O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO and Cl<sub>2</sub> in the region below 300 K.— «J. Chem. Phys.», 1972, vol. 57, N 3.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., «Наука», 1968.
12. Гиршфельдер Дж., Кертин Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М., ИЛ, 1961.
13. Ступоченко Е. В., Лосев С. А., Осипов А. И. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1965.
14. Rapp D., Kassa! T. The theory of vibrational energy transfer between simple molecules in nonreactive collisions.— «Chem. Rev.», 1969, vol. 69, N 1.
15. Rapp D., Englander-Golden P. Resonant and near-resonant vibrational-vibrational energy transfer between molecules in collisions.— «J. Chem. Phys.», 1964, vol. 40, N 2.
16. Rapp D. Interchange of vibrational energy between molecules in collisions.— «J. Chem. Phys.», 1965, vol. 43, N 1.
17. Гордиев Б. Ф., Осипов А. И., Ступоченко Е. В., Шеленин Л. А. Колебательная релаксация в газах и молекулярные лазеры.— «Усп. физ. наук», 1972, т. 108, вып. 4.
18. Jeffers W. Q., Kelley J. D. Calculations of V — V transfer probabilities in CO — CO collisions.— «J. Chem. Phys.», 1971, vol. 55, N 9.
19. Shin H. K. Vibrational transitions in atom-diatom systems. Use of the Lennard — Jones potential.— «J. Phys. Chem.», 1973, vol. 77, N 13.
20. Sato L., Tsuchiya S., Kwiatani K. Shock-wave study of vibrational energy exchange between diatomic molecules.— «J. Chem. Phys.», 1969, vol. 50, N 5.
21. Mc Laren T. I., Appleton J. P. — In: Proc. of Eighth International Shock Tube Symposium. London, 1971.
22. Rosenberg C. W., Bray K. C. N., Pratt N. H. Shock tube vibrational relaxation measurements: N<sub>2</sub> relaxation by H<sub>2</sub>O and the CO — N<sub>2</sub> V — V rate.— «J. Chem. Phys.», 1972, vol. 56, N 7.
23. Millican R. C., White D. R. Systematics of vibrational relaxation.— «J. Chem. Phys.», 1963, vol. 39, N 12.
24. Ormonde S. Vibrational relaxation theories and measurements.— «Reviews of Modern Physics», 1975, vol. 47, N 1.