

Трехблочная модель кинетики колебательно-возбужденных молекул $I_2(X)$ в активной среде кислородно-иодного лазера

С.Ю.Пичугин

Разработана трехблочная модель кинетики колебательно-возбужденных молекул $I_2(X, v)$ в активной среде химического кислородно-иодного лазера. В этой модели вместо системы уравнений, описывающих изменение концентраций $I_2(X, v)$ ($v = 0 - 47$), используются уравнения для суммарных концентраций молекул иода, находящихся в блоках колебательных уровней с $v \leq 10$, $v = 11 - 24$ и $v \geq 25$. Найдены эффективные константы скорости дезактивации молекул $I_2(X, 11 \leq v \leq 24)$ для лазерных сред различного состава. Результаты расчетов с применением разработанной модели согласуются с экспериментальными данными и близки к расчетным параметрам, полученным ранее при использовании полной системы уравнений для населенностей отдельных колебательных уровней $I_2(X, v)$.

Ключевые слова: химический кислородно-иодный лазер, колебательно-возбужденные молекулы иода, эффективные константы скорости дезактивации.

1. Введение

Кислородно-иодный лазер (КИЛ) является перспективным источником когерентного излучения мощностью до нескольких мегаватт [1]. В настоящее время исследования КИЛ активно ведутся в различных направлениях: разработка химических [2–8] и электроразрядных [9–14] генераторов синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta)$, изучение кинетических процессов в активных средах КИЛ [15–30], улучшение энергетических характеристик [31–41] и т. д. Численное моделирование кинетических процессов позволяет существенно снизить затраты на оптимизацию характеристик КИЛ [25, 26, 42, 43]. Однако моделирование трехмерных реагирующих газодинамических потоков осложнено многообразием химических и энергообменных процессов, протекающих в активной среде лазера.

На рис. 1 представлены энергетические уровни I , O_2 , I_2 и H_2O , которые наиболее важны в кинетике процессов, происходящих в активной среде химического КИЛ (ХКИЛ). Здесь и далее атомы и молекулы $I(^2P_{3/2})$, $I(^2P_{1/2})$, $O_2(X^3\Sigma)$, $O_2(a^1\Delta)$, $O_2(b^1\Sigma)$, $I_2(X^1\Sigma)$, $I_2(A'^3\Pi_u)$ и $I_2(A^3\Pi_u)$ обозначаются как I , I^* , $O_2(X)$, $O_2(a)$, $O_2(b)$, $I_2(X)$, $I_2(A')$ и $I_2(A)$ соответственно. Около 50 колебательных уровней $I_2(X)$ учитываются в расчетах с использованием многоканальной модели диссоциации молекул иода [21, 44]. Свыше 200 реакций для более 70 компонентов описывают кинетику процессов в активной среде ХКИЛ, и их полный учет представляет сложную проблему при численном расчете лазерных характеристик, особенно в случае трехмерного моделирования [25, 26, 42, 43].

С.Ю.Пичугин. Самарский филиал Физического института им.П.Н. Лебедева РАН, Россия, 443011 Самара, ул. Ново-Садовая, 221; e-mail: theor@fian.smr.ru

Поступила в редакцию 5 апреля 2012 г., после доработки – 14 июня 2012 г.

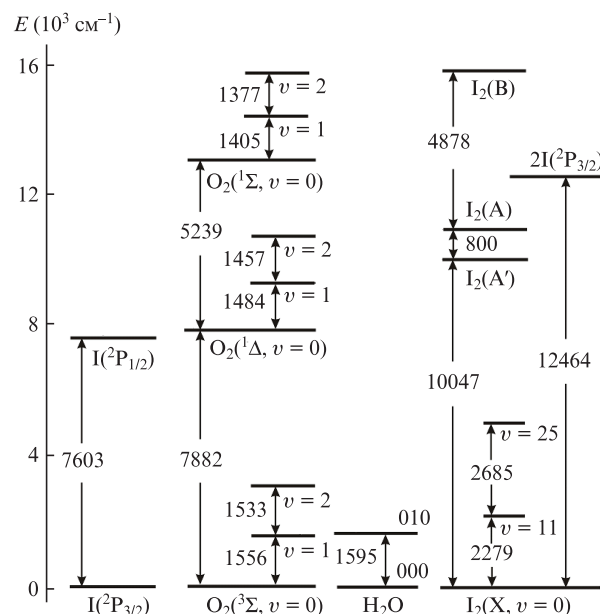
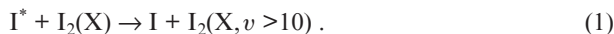


Рис. 1. Энергетические уровни атома I и молекул O_2 , H_2O , I_2 .

Основная цель настоящей работы – упрощение кинетической модели ХКИЛ для удобства расчетов. В предлагаемой модели система уравнений для населенностей колебательно-возбужденных молекул $I_2(X, v)$ с $v > 10$ сведена к двум уравнениям для суммарных населенностей молекул иода на колебательных уровнях с $v = 11 - 24$ и $v \geq 25$. Рассчитаны эффективные константы скорости дезактивации молекул $I_2(X, 11 \leq v \leq 24)$ с учетом условий в различных активных средах ХКИЛ. Была проверена применимость развитой модели для расчета скорости диссоциации I_2 , наблюдаемой в недавних экспериментальных исследованиях.

2. Трехблочная модель кинетики колебательно-возбужденных молекул I₂(X, v) в активной среде ХКИЛ

Хорошо известно, что возбужденные атомы иода I* быстро тушатся молекулами I₂(X) в электронно-колебательном (EV) процессе



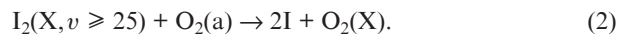
Высокая относительная концентрация молекул I₂(X, v), возбужденных на колебательные уровни с $v \leq 45$, отмечена в работах [45–47]. Экспериментально было показано, что в ходе реакции (1) образуются колебательно-возбужденные молекулы I₂(X, 25 < v < 43) [45]. В работе [45] возбужденные атомы иода получены при фотолизе либо смеси I₂–Ag излучением с длиной волны $\lambda = 475$ нм, либо смеси CF₃I–I₂–Ag излучением с $\lambda = 266$ нм. Методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) молекулы I₂(X, v) были зарегистрированы также в смеси I₂–O₂(a)–O₂ [46, 47]. В экспериментах [46, 47] молекулы O₂(a) получены с помощью разрядного генератора и пары I₂ инжестировались в поток кислорода. В присутствии синглетного кислорода происходила диссоциация молекул иода и благодаря процессу ЕЕ-обмена $I + O_2(a) \rightarrow I^* + O_2(X)$ образовывались возбужденные атомы I*. В [46] были зарегистрированы молекулы I₂(X, v) с колебательными квантовыми числами $33 \leq v \leq 44$. В [47] экспериментально найдено распределение абсолютной концентрации молекул иода по колебательным уровням с $5 \leq v \leq 45$.

Для описания механизма колебательного возбуждения молекул иода необходимо знать вероятности γ_v образования молекул I₂(X) на v-м колебательном уровне в реакции (1). В работе [48] представлено распределение γ_v (в относительных единицах) по колебательным уровням с $24 \leq v \leq 47$, полученное из анализа результатов измерений относительных населенностей I₂(X, v). Это распределение имеет максимум при $v = 40$. В экспериментах [47] обнаружено, что концентрация молекул I₂(X, v = 11–23), образующихся сразу же после инжестирования молекулярного иода в поток, содержащий синглетный кислород, значительно превышает концентрацию колебательно-возбужденных молекул иода с $v \geq 30$. Такие большие населенности колебательных уровней I₂(X) при $10 < v \leq 23$ могут быть объяснены только их прямой накачкой в ходе реакции (1) [21, 49, 50]. Анализ измеренных в [47] концентраций молекул I₂(X, v) показывает, что распределение γ_v по колебательным уровням имеет два максимума: при $v = 40$ и $v = 20–22$ [21, 49, 50]. Необычное двугорбое распределение γ_v может быть объяснено существованием двух различных механизмов тушения I* молекулами I₂(X) [49]. Вероятности возбуждения v-го колебательного уровня I₂(X) в реакции (1) были оценены в [49] на основе сравнения расчетных значений населенностей I₂(X, v) с измеренными в экспериментах. Удовлетворительное согласие с экспериментальными данными было достигнуто при следующих значениях суммарных вероятностей колебательно-возбуждения молекул I₂(X): $\Gamma_{25 \leq v \leq 47} = \sum_{v=25}^{47} \gamma_v \approx 0.1$ и $\Gamma_{15 \leq v \leq 24} = \sum_{v=15}^{24} \gamma_v \approx 0.9$.

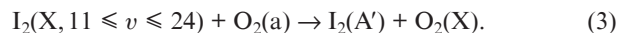
Релаксация молекул I₂(X, v) исследовалась в работах [45–48]. Константы скорости колебательно-вращательной релаксации молекул I₂(X, v, J) приведены в [48] для колебательно-вращательных уровней с $v = 23, J = 57; v = 38, J = 49$ и $v = 42, J = 17$. Константы скорости $K_{v,v-1}^M$ про-

цессов VT релаксации $I_2(X, v) + M \rightarrow I_2(X, v-1) + M$ были определены для $v = 23$ и 38 при $M = He, Ar, N_2, O_2, Cl_2, I_2, H_2O$ из численного анализа спектров ЛИФ молекул иода. Зависимость $K_{v,v-1}^M$ от номера колебательного уровня найдена не была. В [48] полагалось, что константы скорости VT релаксации молекул I₂(X) определяются выражениями $K_{v,v-1}^M = v^s K_{1,0}^M$, где значение s лежит в интервале 0–1.

Резонно разделить колебательные уровни I₂(X, v) на три блока: уровни с $0 \leq v \leq 10, 11 \leq v \leq 24$ и $v \geq 25$. Предположим, что молекулы I₂(X, v) диссоциируют при столкновениях с молекулами O₂(a), если $v \geq 25$:



В этом случае достигается хорошее согласие между полученным в расчетах [21, 49, 50] распределением концентраций молекул I₂(X, v) по колебательным уровням и экспериментальным распределением [47], в котором имеется резкий спад концентрации молекул I₂(X, v) при $v > 24$. Молекулы I₂(X, v), находящиеся на колебательных уровнях с $11 \leq v \leq 24$, могут принимать участие в образовании электронно-возбужденных состояний I₂(A'):



По различным оценкам константа скорости процесса (3) составляет $10^{-12}–2 \times 10^{-11}$ см³/с [21, 25]. Колебательно-возбужденные молекулы иода с $v \leq 10$ не дают существенного вклада в процесс диссоциации I₂ вследствие того, что их энергии недостаточно для образования какого-либо промежуточного состояния при столкновениях с молекулами O₂(a). В предлагаемой в настоящей работе трехблочной модели колебательного возбуждения и релаксации I₂(X, v) молекулы I₂(X, v ≤ 10) будут рассматриваться как молекулы, находящиеся на эффективном нулевом колебательном уровне. Изменение во времени концентраций N_{I₂}(v) молекул I₂(X, v) с $v \geq 11$ в активной среде ХКИЛ описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dN_{I_2}(v)}{dt} = & \gamma_v K_1 N_{I^*} N_{I_2} - K_3(v) N_a N_{I_2}(v) \\ & + \sum_M [K_{v-1,v}^M N_{I_2}(v-1) + K_{v+1,v}^M N_{I_2}(v+1) \\ & - K_{v,v-1}^M N_{I_2}(v) - K_{v,v+1}^M N_{I_2}(v)] N_M \end{aligned} \quad (4)$$

для $v = 11–24$ и

$$\begin{aligned} \frac{dN_{I_2}(v)}{dt} = & \gamma_v K_1 N_{I^*} N_{I_2} - K_2(v) N_a N_{I_2}(v) \\ & + \sum_M [K_{v-1,v}^M N_{I_2}(v-1) + K_{v+1,v}^M N_{I_2}(v+1) \\ & - K_{v,v-1}^M N_{I_2}(v) - K_{v,v+1}^M N_{I_2}(v)] N_M \end{aligned} \quad (5)$$

для $v = 25, 26, \dots$. Здесь N_{I^*}, N_a и N_M – концентрации атомов I*, молекул O₂(a) и компонента M (M = O₂, N₂, He, CO₂) соответственно; K_1 – константа скорости реакции (1); $K_{v,v-1}^M$ и $K_{v-1,v}^M$ – константы скорости прямого и обратного процессов $I_2(X, v) + M \leftrightarrow I_2(X, v-1) + M$; $K_3(v)$ и $K_2(v)$ – константы скорости процессов $O_2(a) + I_2(X, v) \rightarrow O_2(X) + I_2(A')$ и $O_2(a) + I_2(X, v) \rightarrow O_2(X) + 2I$ соответственно. Уменьшение числа молекул I₂(X, v) в этих процессах описывается вторыми членами в уравнениях (4) и (5).

Первые члены в них – это скорости накачки v -го колебательного уровня $I_2(X, v)$ в реакции (1). Сумма членов в квадратных скобках – скорость прямых и обратных каскадных VT процессов в предположении, что в этих процессах изменение номера уровня $\Delta v = \pm 1$. В расчетах полагается, что $K_{v, v-1}^M = vK_{1,0}^M$, а значения $K_{v-1, v}^M$ вычисляются с помощью принципа детального баланса. Константы $K_{1,0}^M$ приведены в работе [48]. Также полагается, что константы скорости $K_2(v)$ и $K_3(v)$ не зависят от номера колебательного уровня: $K_2(v) = K_2$ и $K_3(v) = K_3$. Теперь, суммируя уравнения (4) по $11 \leq v \leq 24$, а уравнения (5) по $25 \leq v \leq 47$ и полагая, что $N_{1,0}^M = 0$ для $v > 47$, получаем

$$\frac{dN^*}{dt} = \Gamma_{11 \leq v \leq 24} K_1 N_1^* N_{I_2} - K_3 N_a N^* - \sum_M K_{1-0}^M N^* N_M + \sum_M K_{2-1}^M N^{**} N_M, \quad (6)$$

$$\frac{dN^{**}}{dt} = \Gamma_{25 \leq v \leq 47} K_1 N_1^* N_{I_2} - K_2 N_a N^{**} - \sum_M K_{2-1}^M N^{**} N_M. \quad (7)$$

Здесь N^* и N^{**} – суммарные концентрации молекул $I_2(X, v)$, находящихся на уровнях с $v = 11-24$ (эффективный колебательный уровень 1) и с $v = 25-47$ (эффективный колебательный уровень 2) соответственно;

$$K_{1-0}^M = \frac{K_{11,10}^M \{N_{I_2}(11) - \exp[-\Delta E_{11}^{I_2}/(kT)]N_{I_2}(10)\}}{N^*},$$

$$K_{2-1}^M = \frac{K_{25,24}^M \{N_{I_2}(25) - \exp[-\Delta E_{25}^{I_2}/(kT)]N_{I_2}(24)\}}{N^{**}}$$

– эффективные константы скорости дезактивации молекул $I_2(X, 11 \leq v \leq 24)$ и $I_2(X, 25 \leq v \leq 47)$ при столкновениях с молекулами или атомами компонента М [51]; $\Delta E_v^{I_2}$ – разность энергий молекул $I_2(X, v)$, находящихся на уровнях с номерами v и $v - 1$. Заметим, что вероятность $\Gamma_{11 \leq v \leq 24} = \sum_{v=11}^{24} \gamma_v$ в (6) равна упомянутой выше суммарной вероятности $\Gamma_{15 \leq v \leq 24}$, если $\gamma_v = 0$ для $v = 11-14$. Очевидно, что в уравнениях для концентраций $O_2(a)$, $I_2(X)$ и $I_2(A')$ члены, описывающие их изменение в реакциях (2), (3), будут включать в себя введенные в рассмотрение переменные N^* и N^{**} и не будут содержать населенностей отдельных колебательных уровней $I_2(X)$. Резонно предположить, что в реакциях с участием молекул $I_2(X)$, в которых, в отличие от реакций (2) и (3), не конкретизируется степень колебательного возбуждения $I_2(X)$, участвуют только молекулы $I_2(X, 0 \leq v \leq 10)$. Концентрация таких молекул мало отличается от общей концентрации $I_2(X)$. Таким образом, в расчетах вместо системы с большим числом уравнений для населенностей молекул $I_2(X, v)$ ($0 \leq v \leq 47$) [44] можно использовать только уравнение для концентрации $I_2(X)$ и уравнения (6), (7) для суммарных населенностей N^* и N^{**} молекул иода, находящихся соответственно на колебательных уровнях с $11 \leq v \leq 24$ и $25 \leq v \leq 47$. Важно, что при этом не требуется знание вероятностей γ_v образования молекул $I_2(X, v)$ на каждом колебательном уровне – в уравнениях (6), (7) присутствуют только суммарные вероятности $\Gamma_{11 \leq v \leq 24}$ и $\Gamma_{25 \leq v \leq 47}$.

При вычислении K_{1-0}^M и K_{2-1}^M концентрации $N_{I_2}(10)$, $N_{I_2}(11)$, $N_{I_2}(24)$, $N_{I_2}(25)$, N^* и N^{**} могут быть найдены из численного решения уравнений (4), (5) совместно с уравнениями химической и колебательной кинетики процессов в активной среде ХКИЛ [44]. В настоящей работе рассчитывались значения N^* и N^{**} , K_{1-0}^M и K_{2-1}^M для

типичных условий в активных средах ХКИЛ состава $O_2(X):O_2(a):N_2(He, CO_2) = 0.5:0.5:\varepsilon$ ($\varepsilon = 1-3$). Расчетные величины K_{1-0}^M и K_{2-1}^M зависели от используемого значения K_3 и относительного содержания ε буферного газа в смеси. При этом во всех случаях K_{1-0}^M , $K_{2-1}^M \ll K_2$ и $N^*/N^{**} \geq 10$. Это означает, что скорость перехода с эффективного колебательного уровня 2 на эффективный уровень 1 много меньше скорости процесса (2) и скорости накачки эффективного колебательного уровня 1 в процессе (1). Результаты расчетов показывают, что последние члены в уравнениях (6) и (7) много меньше остальных, и для упрощения ими можно пренебречь. Важно отметить, что расчетные значения K_{1-0}^M почти не зависят от времени – это говорит о правомерности использования величин K_{1-0}^M в качестве эффективных констант. Расчетные значения эффективных констант скорости дезактивации молекул $I_2(X, 11 \leq v \leq 24)$ в активных средах ХКИЛ при различных значениях константы скорости реакции (3) представлены в табл.1.

Табл.1. Эффективные константы скорости дезактивации молекул $I_2(X, 11 \leq v \leq 24)$ в смеси $O_2(X):O_2(a):N_2(He, CO_2) = 0.5:0.5:\varepsilon$.

K_3 (см ³ /с)	ε	$K_{1-0}^{O_2}$ (10 ⁻¹² см ³ /с)	$K_{1-0}^{N_2}$ (10 ⁻¹² см ³ /с)	K_{1-0}^{Ne} (10 ⁻¹² см ³ /с)	$K_{1-0}^{CO_2}$ (10 ⁻¹² см ³ /с)
10 ⁻¹²	1	1.8	2.3	2.7	4.1
	2	1.9	2.4	2.7	4.3
	3	2.0	2.5	2.8	4.3
10 ⁻¹¹	1	1.3	1.7	1.9	2.9
	2	1.5	1.9	2.2	3.4
	3	1.6	2.1	2.4	3.7
2 × 10 ⁻¹¹	1	0.9	1.1	1.3	2.0
	2	1.2	1.5	1.7	2.6
	3	1.3	1.7	2.0	3.0

3. Результаты расчетов

Было проведено численное решение системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение с расстоянием $x = Vt$ (V – скорость газового потока) относительных концентраций η_i (концентраций, деленных на полную концентрацию кислорода) атомов I^* , молекул $O_2(a)$, $O_2(b)$, $I_2(X)$, $I_2(A')$, $I_2(A)$, колебательно-возбужденных молекул $O_2(v)$ ($v = 1, 2, 3, 4$) и $H_2O(010)$, а также газовой температуры [44]. При этом вместо уравнений для относительных концентраций молекул $I_2(X, v)$ использовались уравнения, описывающие изменение относительных суммарных концентраций $\eta^* = N^*/N_{O_2}$ и $\eta^{**} = N^{**}/N_{O_2}$ с расстоянием x , аналогичные уравнениям (6), (7). Последние члены в этих уравнениях, содержащие константы K_{2-1}^M , полагались равными нулю, а константы K_{1-0}^M для $M = O_2$ и N_2 брались из табл.1. Начальные значения концентраций компонентов, температуры и скорости газового потока соответствовали экспериментальным [21]. На рис.2 представлены измеренные в экспериментах [21] концентрации атомов I^* для смеси $O_2:N_2=1:1$ с содержанием паров воды $\eta_w = 3\%$ и начальной относительной концентрацией синглетного кислорода $\eta_a = 50\%$ при изменении начального содержания паров иода η_{I_2} от 0.29% до 1.23%. Там же приведены рассчитанные в настоящей работе зависимости концентраций I^* от расстояния x вдоль по потоку и результаты расчетов [21, 44], полученные с использованием уравнений для населенностей отдельных колебательных уровней $I_2(X)$. В наших расчетах константа

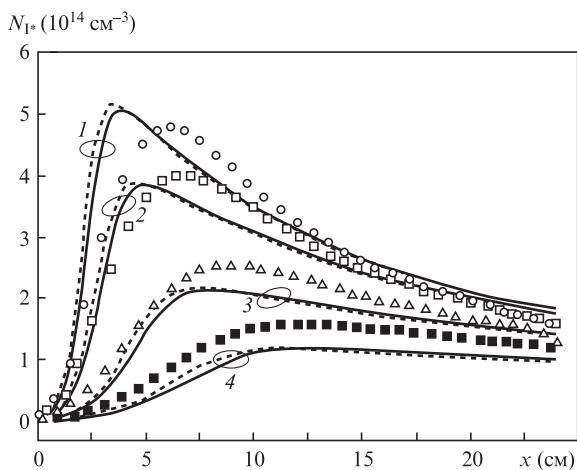


Рис.2. Зависимости концентраций атомов I^* от расстояния x вдоль по потоку для смеси $O_2:N_2 = 1:1$ с содержанием паров воды $\eta_w = 3\%$ и начальной относительной концентрацией синглетного кислорода $\eta_a = 50\%$ при начальном содержании паров иода $\eta_{I_2} = 1.23\%$ (давление смеси $p = 2.2$ Тор) ($\circ, 1$), 0.94% ($p = 2.1$ Тор) ($\square, 2$), 0.52% ($p = 2$ Тор) ($\triangle, 3$) и 0.29% ($p = 1.9$ Тор) ($\blacksquare, 4$). Точки – экспериментальные данные [21]. Сплошные кривые – расчетные зависимости, полученные в настоящей работе, штриховые кривые – результаты расчетов [21, 44] с использованием уравнений для населенностей отдельных колебательных уровней $I_2(X)$.

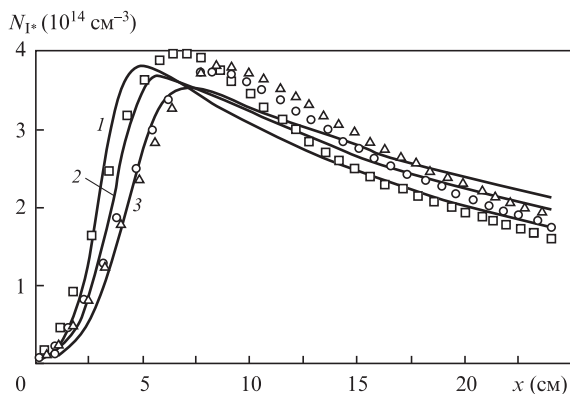


Рис.3. Зависимости концентраций атомов I^* от расстояния x при начальной относительной концентрации паров иода $\eta_{I_2} = 0.94\%$ и различном содержании в смеси буферного газа азота: $N_2:O_2 = 1:1$ ($p = 2.1$ Тор) ($\square, 1$), $N_2:O_2 = 2:1$ ($p = 3$ Тор) ($\circ, 2$) и $N_2:O_2 = 3:1$ ($p = 3.8$ Тор) ($\triangle, 3$). Точки – экспериментальные данные [21]. Сплошные кривые – расчетные зависимости, полученные в настоящей работе.

скорости реакции (3) полагалась равной 10^{-11} cm^3/c , а для суммарных вероятностей колебательно возбуждения молекул $I_2(X)$ в процессе (1) использовались значения $\Gamma_{15 \leq v \leq 24} = 0.9$ и $\Gamma_{25 \leq v \leq 47} = 0.1$. На рис.3 представлены распределения концентраций возбужденных атомов иода вдоль потока при начальной относительной концентрации паров иода $\eta_{I_2} = 0.94\%$ и различном содержании в смеси буферного газа N_2 . Из рис.2 и 3 видно, что расчетные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными. При этом результаты расчетов, полученные в [21, 44], незначительно отличаются от результатов расчетов, проведенных в настоящей работе.

4. Заключение

Таким образом, в данной статье разработана трехблочная модель кинетики колебательно-возбужденных молекул иода $I_2(X, v)$ в активной среде ХКИЛ. В этой мо-

дели вместо системы с большим числом уравнений, описывающих изменение концентраций молекул $I_2(X, v)$, используются уравнения для суммарных концентраций молекул иода, находящихся в блоках колебательных уровней с $v \leq 10$, $v = 11-24$ и $v \geq 25$. С учетом условий, характерных для активных сред ХКИЛ, найдены эффективные константы скорости дезактивации молекул $I_2(X, 11 \leq v \leq 24)$ при столкновениях с молекулами O_2 , N_2 , CO_2 и атомами He. Результаты расчетов с применением уравнений трехблочной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными и близки к результатам расчетов, полученным ранее при использовании системы уравнений для населенностей отдельных колебательных уровней $I_2(X)$.

- Truesdell K.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 63461L (2007).
- Jirásek V., Hrubý J., Špalek O., Censký M., Kodymová J. *Appl. Phys. B*, **4**, 779 (2010).
- Špalek O., Hrubý J., Censký M., Jirásek V., Kodymová J. *Appl. Phys. B*, **100**, 793 (2010).
- Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **38**, 794 (2008).
- Rajesh R., Singhal G., Mainuddin, Tyagi R.K., Dawar A.L. *Opt. Laser Technol.*, **42**, 580 (2010).
- Цуи Р., Денг Л., Ши В., Янг Х., Ша Г., Жанг Ц. *Квантовая электроника*, **41**, 139 (2011).
- Hewett K.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7131**, 71310I (2009).
- Адаменков А.А., Выскубенко Б.А., Ильин С.П., Круковский И.М. *Квантовая электроника*, **32**, 490 (2002).
- Palla A.D., Zimmerman J.W., Woodard B.S., Carroll D.L., Verdeyen J.T., Lim T.C., Solomon W.C. *J. Phys. Chem. A*, **111**, 6713 (2007).
- Lee S., Rawlins W.T., Davis S.J. *Chem. Phys. Lett.*, **469**, 68 (2009).
- Chukalovsky A.A., Rakhimova T.V., Klopovsky K.S. *Plasma Phys. Rep.*, **37**, 251 (2011).
- Hicks A., Bruzese J.R., Adamovich I.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 025206 (2010).
- Hill A.E. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 041116 (2007).
- Shepelenko A.A., Mikheyev P.A., Voronov A.I., Kupryaev N.V. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 245203 (2008).
- Ionin A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Yuryshv N.N. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, R25 (2007).
- Kochetov I.V., Napartovich A.P., Vagin N.P., Yuryshv N.N. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 355204 (2011).
- Аязов В.Н. *Квантовая электроника*, **39**, 989 (2009).
- Heaven M.C. *Laser Photonics Rev.*, **4**, 671 (2010).
- Yuryshv N.N. *Квантовая электроника*, **28**, 397 (1998).
- McDermott W.E., Hobbs K., Henshaw T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **7131**, 71312L (2009).
- Azyazov V.N., Pichugin S.Yu., Heaven M.C. *J. Chem. Phys.*, **130**, 104306 (2009).
- Azyazov V.N., Antonov I.O., Heaven M.C. *J. Phys. Chem. A*, **111**, 3010 (2007).
- Azyazov V.N., Mikheyev P.A., Postell D., Heaven M.C. *Chem. Phys. Lett.*, **482**, 56 (2009).
- Mikheyev P.A., Azyazov V.N. *J. Appl. Phys.*, **104**, 123111 (2008).
- Waichman K., Barmashenko B.D., Rosenwaks S. *J. Appl. Phys.*, **106**, 063108 (2009).
- Waichman K., Barmashenko B.D., Rosenwaks S. *J. Chem. Phys.*, **133**, 084301 (2010).
- Azyazov V.N., Heaven M.C. *Chem. Phys. Lett.*, **502**, 150 (2011).
- Загидуллин М.В., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **40**, 800 (2010).
- Загидуллин М.В., Хватов Н.А., Нягашкин А.Ю. *Квантовая электроника*, **41**, 135 (2011).
- Аязов В.Н., Воробьев М.В., Воронов А.И., Купряев Н.В., Михеев П.А., Уфимцев Н.И. *Квантовая электроника*, **39**, 84 (2009).
- Борейшо А.С., Баркан А.Б., Васильев Д.Н., Евдокимов И.М., Савин А.В. *Квантовая электроника*, **35**, 495 (2005).
- Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **35**, 907 (2005).

33. Адаменков А.А., Бакшин В.В., Богачев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 601 (2007).
34. Antonov I.O., Azyazov V.N., Mezhenin A.V., Popkov G.N., Ufimtsev N.I. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 051115 (2006).
35. Азязов В.Н., Загидуллин М.В., Николаев В.Д., Свистун М.И., Хватов Н.А. *Квантовая электроника*, **22**, 443 (1995).
36. Katz A., Dahan Z., Rybalkin V., Waichman K., Barmashenko B.D., Rosenwaks S. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 161122 (2007).
37. Woodard B.S., Zimmerman J.W., Benavides G.F., Carroll D.L., Verdeyen J.T., Palla A.D., Field T.H., Solomon W.C., Lee S., Rawlins W.T., Davis S.J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 025208 (2010).
38. Mikheyev P.A., Zagidullin M.V., Azyazov V.N. *Appl. Phys. B*, **101**, 7 (2010).
39. Xu M., Sang F., Jin Y., Fang B., Chen F., Geng Z., Li Y. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **47**, 8446 (2008).
40. Endo M., Masuda T., Uchiyama T. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 71 (2006).
41. Сингхал Г., Мэйнуддин, Раджеж Р. и др. *Квантовая электроника*, **41**, 430 (2011).
42. Carroll D.L. *AIAA J.*, **34**, 338 (1996).
43. Madden T.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 634620 (2006).
44. Azyazov V.N., Heaven M.C., Pichugin S.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6874**, 687408 (2008).
45. Hall G.E., Marinelli W.J., Houston P.L. *J. Phys. Chem.*, **87**, 2153 (1983).
46. Van Benthemt M.H., Davis S.J. *J. Phys. Chem.*, **90**, 902 (1986).
47. Barnault B., Bouvier A.J., Pigache D., Bacis R. *J. Phys. IV*, **1**, C7-647 (1991).
48. Lawrence W.G., van Marter T.A., Nowlin M.L., Heaven M.C. *J. Chem. Phys.*, **106**, 127 (1997).
49. Азязов В.Н., Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **38**, 1101 (2008).
50. Азязов В.Н., Пичугин С.Ю., Хэвен М. *Оптика и спектроскопия*, **107**, 389 (2009).
51. Пичугин С.Ю. *Квантовая электроника*, **38**, 736 (2008).