

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ



ПРЕПРИНТ

2

А.А. ИОНИН, И.В. КОЧЕТОВ,  
А.П. НАПАРТОВИЧ, Д.В. СЕНИЦЫН

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАРАБОТКИ  
СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА В СМЕСЯХ  
КИСЛОРОДА С ГЕЛИЕМ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В  
ПРОТОЧНОМ КРИОГЕННОМ ЩЕЛЕВОМ  
ВЧ РАЗРЯДЕ**

Москва 2013

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАРАБОТКИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА В СМЕСЯХ КИСЛОРОДА С ГЕЛИЕМ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ПРОТОЧНОМ КРИОГЕННОМ ЩЕЛЕВОМ ВЧ РАЗРЯДЕ

А.А.Ионин, Д.В.Синицын

*Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской Академии Наук*

И.В.Кочетов, А.П.Напартович

*Государственный научный центр Российской Федерации*

*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований*

## АННОТАЦИЯ

Разработанная нами ранее кинетическая модель, включающая описание самостоятельного и электроионизационного разрядов в смесях, обогащенных синглетным кислородом, была модифицирована для расчетов характеристик проточного ВЧ разряда в молекулярном кислороде и его смесях с гелием. В кинетическую схему добавлены реакции с участием молекулярного кислорода и атомов гелия в электронно-возбужденных состояниях. Учитывались процессы ионизации Пеннинга, диссоциативной ионизации и диссоциации молекулярного кислорода. Для атомов гелия учтены процессы ионизации и ассоциативной ионизации при столкновении электронно-возбужденных атомов. В модель также включены конверсия и перезарядка ионов. При моделировании использовалось приближение газовой пробки - эволюция компонент плазмы при движении по каналу рассчитывалась как их эволюция во времени. В расчетах скорость движения газа считалась равной 30 м/с, при этом время пролета газа через зону разряда составляло одну миллисекунду. При условии криогенного охлаждения электродов, теплопроводность газа будет заметно уменьшать нагрев газовой смеси в разряде. Для учета этого процесса в уравнение для поступательной температуры газа был добавлен член, отвечающий за уход тепла через электроды. Расчеты проводились для смесей  $O_2:He = 1:0, 1:1, 1:2$  и  $1:3$ , при парциальном давлении кислорода 7.5 Торр. Показано, что в чистом молекулярном кислороде в условиях расчета, несмотря на то, что температура стенок электродов составляет  $\sim 100$  К, теплопроводность не обеспечивает преобладания охлаждения порции газа по сравнению с объемным ее нагревом в разряде. Разбавление молекулярного кислорода гелием заметно меняет поведение температуры газа: теплоотвод начинает преобладать над объемным тепловыделением, и температура газа на выходе из зоны разряда падает до величины  $\sim 150-170$  К при комнатной температуре газа на входе, что чрезвычайно важно с точки зрения достижения порога генерации в электроразрядном кислород-йодном лазере на основе щелевого криогенного ВЧ разряда.

**Ключевые слова:** синглетный кислород, щелевой ВЧ разряд, газовый поток, кинетическая модель

# MODELING OF SINGLET DELTA OXYGEN PRODUCTION IN MIXTURES OF OXYGEN AND HELIUM EXCITED IN GAS FLOW CRYOGENIC SLAB RF DISCHARGE

A.A.Ionin, D.V.Sinitsyn

*P.N.Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences*

I.V.Kochetov, A.P.Napartovich

*State Research Center of Russian Federation*

*Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research*

## ABSTRACT

Developed earlier kinetic model that includes a description of self sustained and electron beam controlled discharges in gas mixtures enriched by singlet oxygen, has been modified to calculate the characteristics of gas flow RF discharge in molecular oxygen and its mixtures with helium. The reactions with participation of molecular oxygen and helium atoms in the electronically excited states were added in the kinetic scheme. Penning ionization processes, dissociative ionization and dissociation of molecular oxygen were accounted. For helium atoms ionization and associative ionization in collisions of electronically excited atoms were taken into account. The model also included the conversion and charge exchange of ions. The plug flow approximation was used in the simulation - the evolution of the plasma components moving through the channel was calculated as their evolution in time. In our calculations the velocity of gas was equal to 30 m/s, and the transit time of the gas flow through the discharge zone was equal to one millisecond. Under conditions of cryogenic cooling of electrode system, the gas thermoconductivity will significantly reduce the heating of the gas mixture in the discharge. To take this process into account a term responsible for the loss of heat through the electrodes was introduced in the equation for the translational temperature of the gas. Calculations were carried out for mixtures of  $O_2:He = 1:0, 1:1, 1:2$  and  $1:3$  with the oxygen partial pressure of 7.5 Torr. It is shown that in conditions of our calculation in pure molecular oxygen, despite the fact that the temperature of the walls of the electrodes is  $\sim 100$  K, the thermal conductivity does not provide prevalence cooling of portion of the gas compared to the volumetric heating in the discharge. The dilution of molecular oxygen with helium significantly alter the behavior of the gas temperature: a heat removal begins to dominate over volumetric heat release, and the gas temperature at the outlet of the discharge zone decreases down to  $\sim 150-170$  K at room temperature at the gas inlet, which is essential to the achievement of threshold in electric discharge oxygen-iodine laser based on a cryogenic slab RF discharge.

**Keywords:** singlet delta oxygen, slab RF discharge, gas flow, kinetic model

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых вопросов, возникающих при исследовании возможностей использования электроразрядных генераторов синглетного кислорода  $O_2(a^1\Delta_g)$  (СК) для построения на их основе кислород-йодных лазеров, является, наряду с максимально достижимым выходом СК  $Y = [O_2(a^1\Delta_g)]/[O_2(X^3\Sigma_g^-)] + [O_2(a^1\Delta_g)]$ , величина поступательной температуры возбужденной в разряде газовой смеси. Для примера, величина порогового выхода СК  $Y_{\text{пор}}$  (минимальное значение  $Y$ , при котором возможна лазерная генерация в кислород-йодной системе) снижается от  $\sim 15\%$  до  $\sim 1\%$  при уменьшении температуры газовой смеси от  $T = 300$  К до  $T = 100$  К. В статьях [1, 2] и в последующих работах как этих, так и других авторов (см., например, [3-9]) вплоть до последнего времени наработка СК осуществлялась продольным высокочастотным (ВЧ) разрядом в электроразрядных трубках относительно большого диаметра. Вследствие этого, малая роль диффузионного охлаждения газа, а значит существенное повышение температуры газовой смеси в разряде, вынуждали использовать сверхзвуковое охлаждение газа после зоны разряда. В последних же работах (см., например [10]) уже используется продольная по отношению к потоку газа концентрическая геометрия электродов ВЧ разряда с охлаждением внутреннего электрода. Такая модернизация разрядной системы позволила авторам [10] более эффективно охлаждать газ в разряде и довести выходную мощность электроразрядного кислород-йодного лазера до уровня  $\sim 500$  Вт.

В то же время, хорошо известно, что щелевой (планарный) электрический ВЧ разряд устойчив при больших давлениях и позволяет эффективно охлаждать возбужденный газ за счет диффузионного охлаждения. Ранее [11, 12] нами экспериментально и теоретически исследовалась кинетика щелевого ВЧ разряда и его послесвечения в газовых смесях, содержащих кислород, в статических условиях, т.е. без потока газа. Теоретическая работа, проведенная в [11], была посвящена созданию полной кинетической модели процессов, определяющих наработку СК в различных разрядах. Созданная модель была протестирована путём сравнения расчетных данных с результатами экспериментов в [12]. В нашей работе [13] проведено экспериментальное и теоретическое исследование генератора СК на основе щелевого ВЧ разряда с поперечным по отношению к

(длинным 300 мм) электродам потоком газа. Была создана новая экспериментальная установка с щелевым ВЧ разрядом и дозвуковым потоком газа, в которой предусмотрена возможность охлаждения электродов. На этой установке исследовано влияние различных экспериментальных параметров на наработку СК в поперечном ВЧ разряде и его последующую транспортировку. Ранее разработанная кинетическая модель была расширена путем включения в нее газодинамических эффектов в газовом потоке, содержащем СК.

Однако, в работе [13] эксперименты проводились при комнатной температуре электродов для чистого кислорода и для газовых смесей кислорода с гелием, а также при криогенной температуре электродов для чистого кислорода. Расчеты же проводились только для комнатной температуры электродов и чистого кислорода в газовом потоке. Для более точного понимания перспектив использования предложенной в [13] схемы генератора СК электроразрядного кислород-йодного лазера необходимо расширить теоретическую модель с целью проведения расчетов процессов наработки СК в условиях криогенного охлаждения электродной системы для газовых смесей кислорода с гелием. Целью настоящей работы является учет теплопроводности возбуждаемого в ВЧ разряде газа и его теплообмена с охлаждаемыми стенками разрядной системы при моделировании реальных экспериментов на установке, подробное описание которой приведено в [13], в гелиевых смесях, когда существенным образом меняются тепловые свойства газового потока и, соответственно, температура возбужденного газа на выходе генератора СК.

## КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Разработанная нами ранее кинетическая модель [14], включающая описание самостоятельного и электроионизационного разрядов в смесях, обогащенных синглетным кислородом, а также при наличии молекул NO и NO<sub>2</sub> [15], была модифицирована для расчетов характеристик проточного ВЧ разряда в молекулярном кислороде [13]. В данной работе модель из [13] обобщается для учета влияния гелия в его смесях с кислородом.

В модели учитываются два электронно-возбужденных состояния гелия. Нижнее метастабильное состояние с энергией 19.8 эВ, обозначенное как He\* и эффективный электронный уровень He\*\* с энергией 20.6 эВ. Этот уровень заменяет собой остальные более высоко лежащие электронные уровни. Сечение возбуждения этого уровня представляет собой сумму сечений этих уровней. Эти сечения, а также сечение ионизации электронным ударом и транспортное сечение рассеяния электронов на атоме гелия взяты из работы [16]. Сечение ионизации из нижнего метастабильного гелия взято из работы [17], а сечение ионизации из эффективного состояния He\*\* таким же, как и для He\*, но сдвинутым на разность энергий этих электронных состояний.

В кинетическую схему добавлены реакции с участием молекулярного кислорода и атомов гелия в электронно-возбужденных состояниях. Учитываются процессы ионизации Пеннинга, диссоциативной ионизации и диссоциации молекулярного кислорода. Для атомов гелия учтены процессы ионизации и ассоциативной ионизации при столкновении электронно-возбужденных атомов. Включены конверсия и перезарядка ионов. Все процессы, учтенные в модели, приведены в Табл. 1.

При моделировании используется приближение газовой пробки - эволюция компонент плазмы при движении по каналу рассчитывалась как их эволюция во времени. В расчетах скорость движения газа считалась 30 м/с.

ВЧ разряд имитировался разрядом постоянного тока при условии, что их мощности равны. Совместно с кинетическими уравнениями решались уравнения для внешней электрической цепи. Моделируемая электрическая цепь состояла из разрядного промежутка и последовательно соединенного источника напряжения и балластного сопротивления, величина которого определялась из условия равенства расчетной и измеренной мощности разряда.

Таблица 1. Процессы с участием гелия.

№ п/п	Реакция	Константа скорости, см <sup>3</sup> /с	Ссылка
1	He + e -> He* + e	a)	[16]
2	He + e -> He** + e	a)	[16]
3	He + e -> He <sup>+</sup> + e + e	a)	[16]
4	He* + e -> He <sup>+</sup> + e + e	a)	[17]
5	He** + e -> He <sup>+</sup> + e + e	a)	оценка
5	He <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e -> He* + He	a)	[18]
6	He* + O <sub>2</sub> -> O <sub>2</sub> <sup>+</sup> + He + e	1.9·10 <sup>-10</sup>	[19]
7	O <sup>+</sup> + O + He + e	1.2·10 <sup>-11</sup>	[19]
8	O + O( <sup>1</sup> D) + He	3.4·10 <sup>-11</sup>	[19]
9	He** + O <sub>2</sub> -> O <sub>2</sub> <sup>+</sup> + He + e	4.2·10 <sup>-10</sup>	[19]
10	O <sup>+</sup> + O + He + e	8.4·10 <sup>-11</sup>	[19]
11	O + O( <sup>1</sup> D) + He	3.4·10 <sup>-11</sup>	оценка
12	He* + He* -> He <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	6.3·10 <sup>-11</sup>	[20]
13	He <sup>+</sup> + He + e	8.4·10 <sup>-10</sup>	[20]
14	He* + He** -> He <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	6.4·10 <sup>-11</sup>	[20]
15	He <sup>+</sup> + He + e	3.4·10 <sup>-10</sup>	[20]
16	He** + He** -> He <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e	-	
17	He <sup>+</sup> + He + e	4.1·10 <sup>-10</sup>	[20]
18	He <sup>+</sup> + He + M -> He <sub>2</sub> <sup>+</sup> + M	1.08·10 <sup>-10</sup>	[21]
19	He <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> -> He + O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	3.8·10 <sup>-10</sup>	[21]
20	He + O <sup>+</sup> + O	6.2·10 <sup>-10</sup>	[21]
21	He <sub>2</sub> <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> -> He + He + O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	3.85·10 <sup>-10</sup>	[21]
22	He + He + O <sup>+</sup> + O	6.2·10 <sup>-10</sup>	[21]

a) константы этих процессов рассчитывались по ФРЭЭ, найденной из решения уравнения Больцмана, и по сечениям соответствующих процессов.

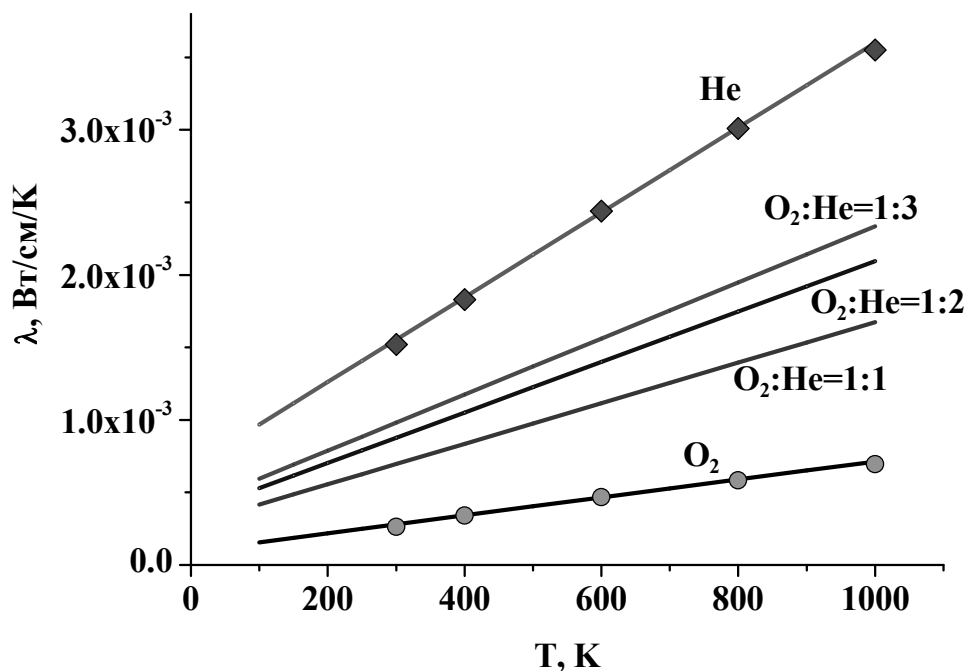
В эксперименте расстояние между алюминиевыми электродами  $d$ , охлаждаемыми жидким азотом, составляет величину 0.3 см, а время пролета - одну миллисекунду. При таких условиях теплопроводность газа будет заметно уменьшать нагрев газовой смеси в разряде. Для учета этого процесса в уравнение для поступательной температуры газа был добавлен член, учитывающий уход тепла через электроды:

$$C_p k N \frac{dT}{dt} = P_{HEATING} - \frac{\lambda}{\Lambda^2} (T - T_{wall}), \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газовой смеси;  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $k$  – постоянная Больцмана;  $N$  – плотность газа;  $\Lambda^2 = (d/\pi)^2$ ;

$P_{HEATING}$  – плотность мощности нагрева газа в разряде и после его окончания. В объемную мощность нагрева газа включены все известные каналы диссипации энергии электронов и возбужденных частиц. Считалось, что температура стенок электродов  $T_{wall}$ , охлаждаемых жидким азотом, равна 100 К, а температура стенок канала  $T_{wall}$  за зоной разряда 300 К. Второй член учитывает охлаждение за счет теплопроводности. В расчетах использовалась линейная интерполяция для зависимости коэффициента теплопроводности газовой смеси от температуры.

Коэффициент теплопроводности для смеси газов рассчитывался по величине коэффициентов теплопроводности для отдельных компонент по формуле Брокау. Величины коэффициентов теплопроводности для отдельных компонент брались из справочника [22]. Рассчитанный таким образом коэффициент теплопроводности, в зависимости от температуры газа для различных газовых смесей кислорода с гелием, приведен на Рис. 1.

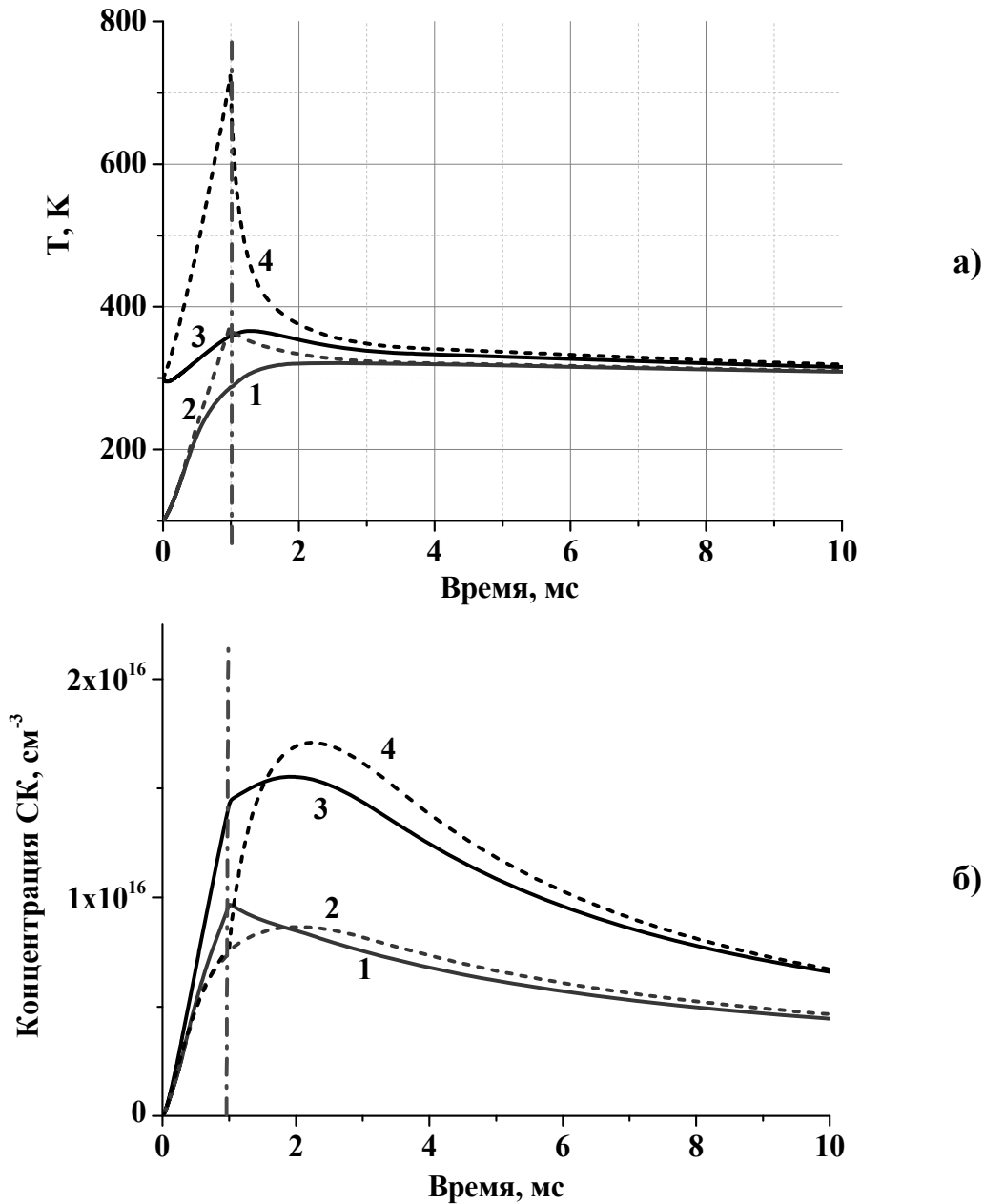


**Рис. 1.** Зависимости коэффициентов теплопроводности газовых смесей молекулярного кислорода и гелия от температуры газа. Маркеры – данные [22], линии – используемая интерполяция.

Из графика видно, что при комнатной температуре разбавление молекулярного кислорода тем же самым объемом гелия приводит к увеличению коэффициента теплопроводности почти в три раза. Эффективное время охлаждения в соответствии с уравнением (1) при комнатной температуре



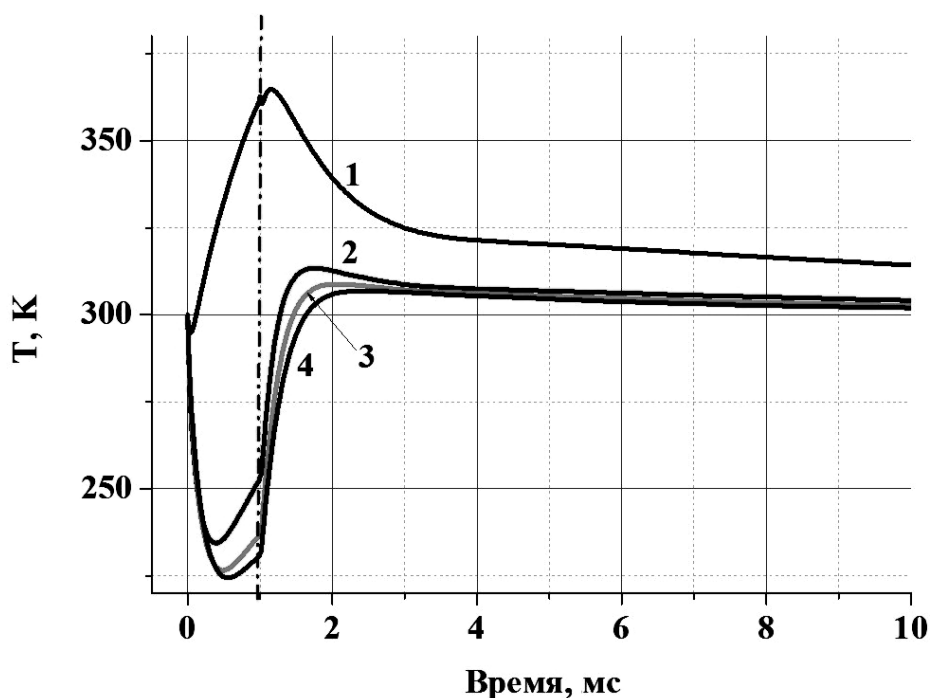
составляет 0.37, 0.26, 0.29 и 0.34 мс для смесей  $O_2:He = 1:0, 1:1, 1:2$  и  $1:3$ , соответственно. Отметим, что давление молекулярного кислорода во всех смесях было фиксировано и составляло 7.5 Торр. Близость времен теплопроводности к времени пребывания порции газа в зоне разряда говорят о важности отвода тепла через охлаждаемые электроды.



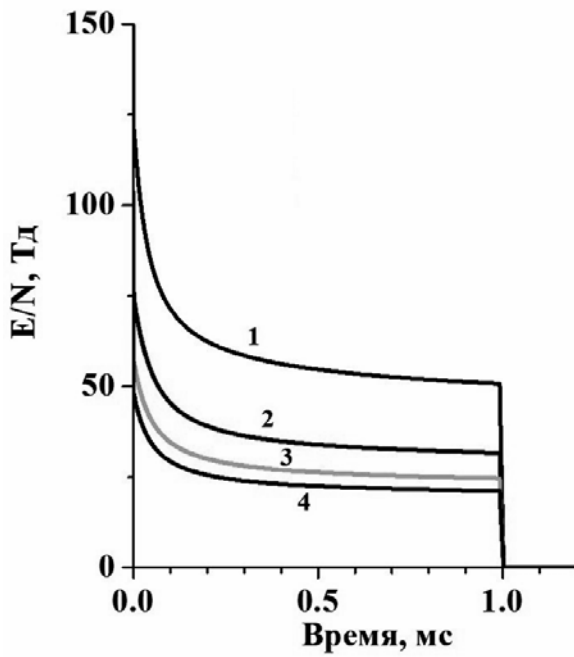
**Рис. 2.** Зависимость поступательной температуры газа (а) и концентрации СК (б) от времени. 1, 2 - начальная температура газа 100 К; 3, 4 – 300 К; 2, 4 – не учитывается теплопроводность газа в зоне разряда. Чистый  $O_2$ ,  $P = 15$  Торр, средняя мощность разряда  $\langle W \rangle = 23$  Вт/см<sup>3</sup>.

В чистом молекулярном кислороде в условиях расчета, несмотря на то, что температура стенок составляет 100 К, теплопроводность не обеспечивает преобладания охлаждения порции газа по сравнению с объемным нагревом. Рис. 2 показывает зависимость температуры газа и концентрации СК от времени для начальной температуры газа 100 К (а) и 300 К (б) (сплошные линии). Пунктирные линии соответствуют случаю отсутствия теплоотвода через стенки электродов. Вертикальная штрихпунктирная линия показывает границу области разряда.

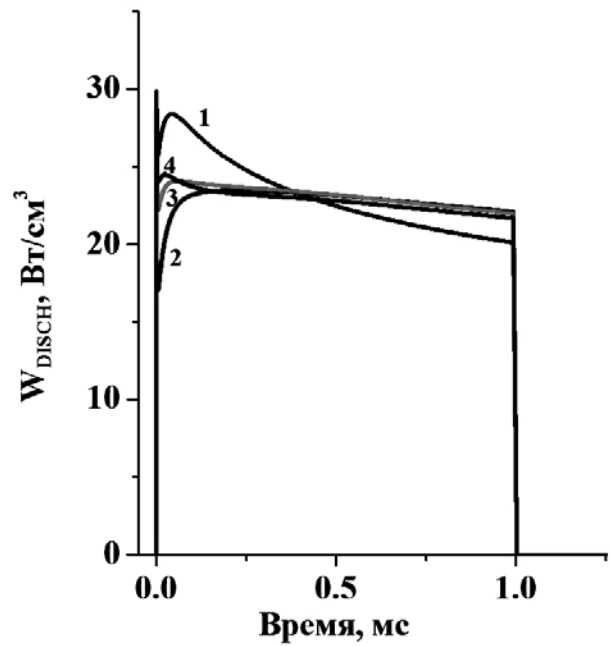
Разбавление молекулярного кислорода гелием заметно меняет поведение температуры газа. Теплоотвод начинает преобладать над объемным тепловыделением, и температура газа падает до величины 150-170 К (Рис. 3). На Рис. 4 и Рис. 5 показана зависимость величин приведенного электрического поля  $E/N$  и мощности разряда от времени. При разбавлении кислорода гелием величина  $E/N$  в момент времени 0.5 мс (в середине области разряда по потоку) составляет 55, 34, 26 и 23 Тд для смесей  $O_2:He = 1:0, 1:1, 1:2$  и  $1:3$ , соответственно.



**Рис. 3.** Зависимость поступательной температуры газа от времени для различных газовых смесей  $O_2:He = 1:0$  (1),  $1:1$  (2),  $1:2$  (3),  $1:3$  (4). Парциальное давление  $O_2$  во всех смесях  $P=7.5$  Торр. Вертикальная штрихпунктирная линия показывает место окончания разряда и охлаждения. Начальная температура газа 300 К, средняя мощность разряда  $\langle W \rangle = 23$  Вт/см<sup>3</sup>.

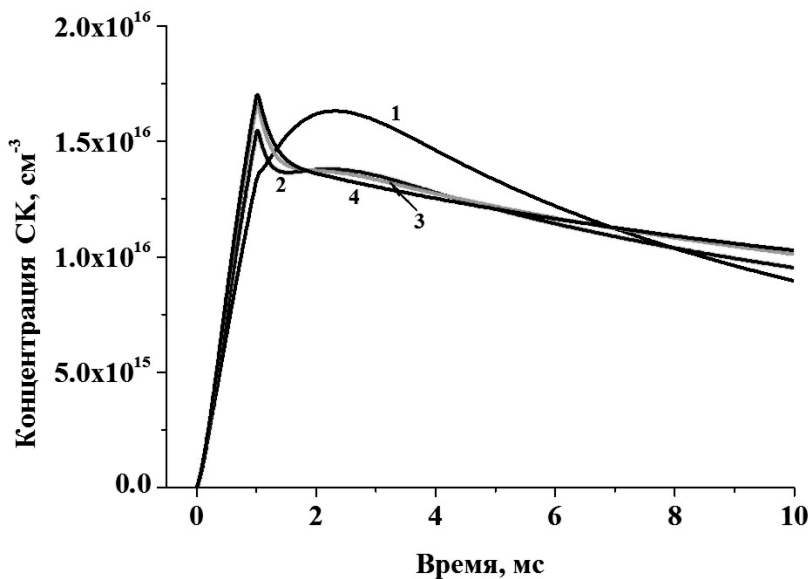


**Рис. 4.** Зависимость величины приведенного электрического поля от времени для различных газовых смесей. Начальная температура газа, средняя мощность разряда и обозначения газовых смесей соответствуют Рис. 3.



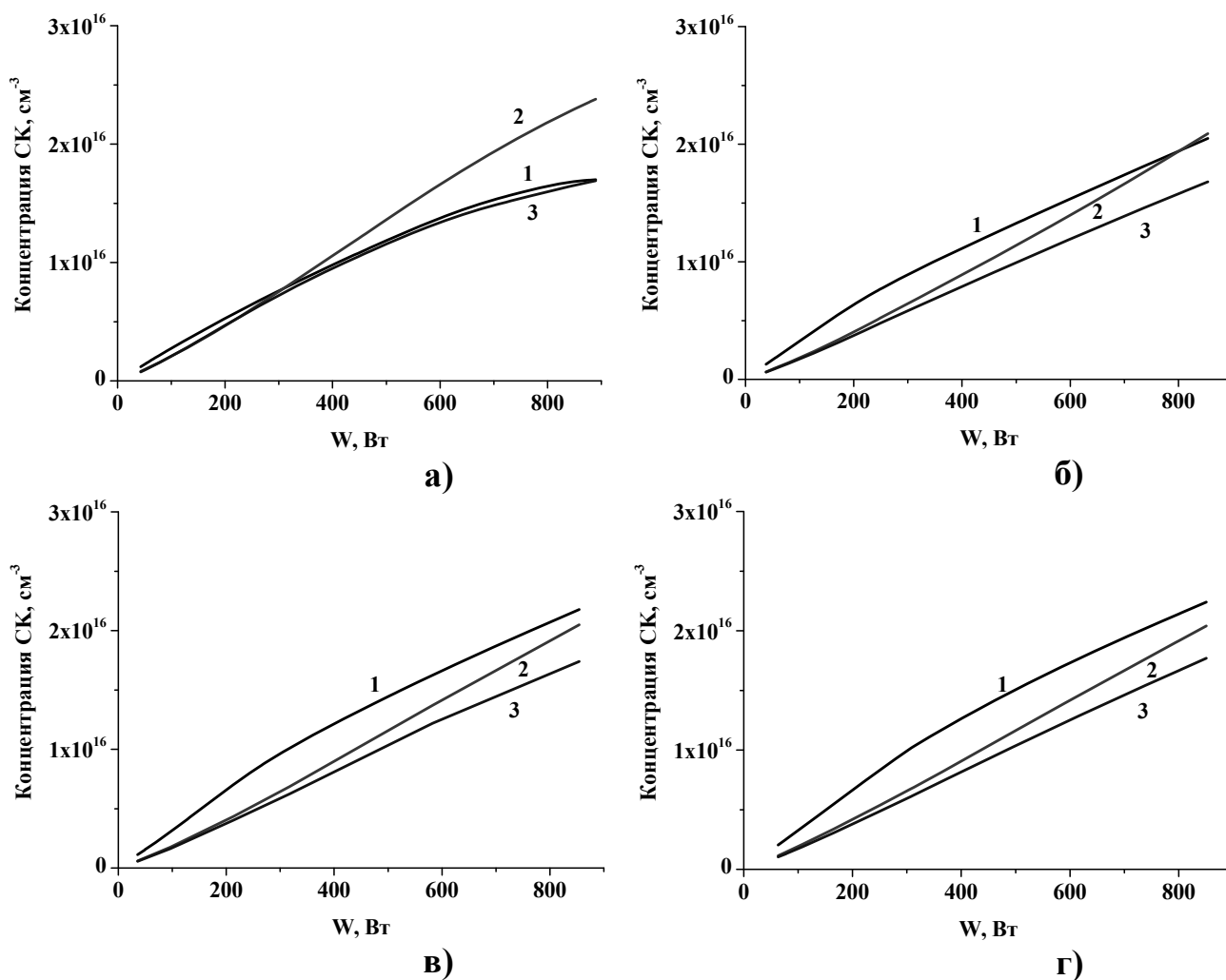
**Рис. 5.** Зависимость мощности разряда от времени для различных газовых смесей. Начальная температура газа, средняя мощность разряда и обозначения газовых смесей соответствуют Рис. 3.

На Рис. 6 показана зависимость концентрации СК от времени для различных газовых смесей. Заметим, что в расчетах мощность разряда для всех смесей поддерживалась постоянной за счет соответствующего подбора балластного сопротивления. Расчет показывает, что максимум концентрации СК примерно один и тот же для разных смесей.



**Рис. 6.** Зависимость концентрации СК от времени для различных газовых смесей. Начальная температура газа, средняя мощность разряда и обозначения газовых смесей соответствуют Рис. 3.

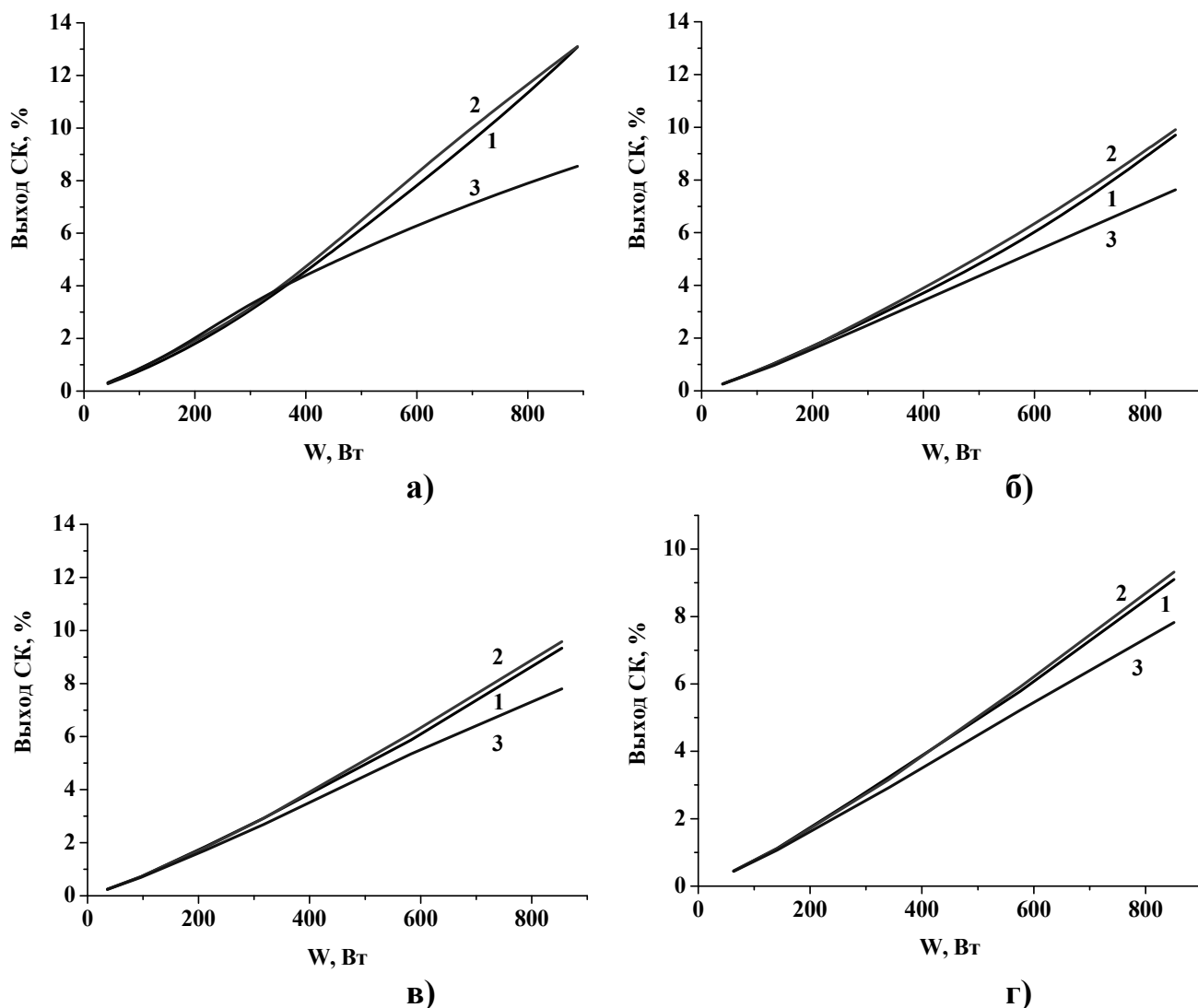
Зависимость концентрации СК от мощности разряда для различных газовых смесей показана на Рис. 7 (а-г). На каждом рисунке приведены три кривые, соответствующие различным моментам времени: 1 мс, 2 мс и 5 мс. Момент времени 1 мс соответствует времени окончания разряда. Максимальная концентрация СК составляет около  $2 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> при мощности разряда 800 Вт для всех исследуемых смесей. Как показывают расчеты в оговоренных условиях, концентрация СК насыщается, как функция мощности разряда, лишь для чистого молекулярного кислорода.



**Рис. 7.** Зависимость концентрации СК от мощности разряда в моменты времени 1 мс (1), 2 мс (2) и 5 мс (3) от начала разряда для смесей O<sub>2</sub>:He=1:0 (а), 1:1 (б), 1:2 (в), 1:3 (г). Парциальное давление O<sub>2</sub> во всех смесях P=7.5 Торр, T<sub>0</sub> = 300 К.

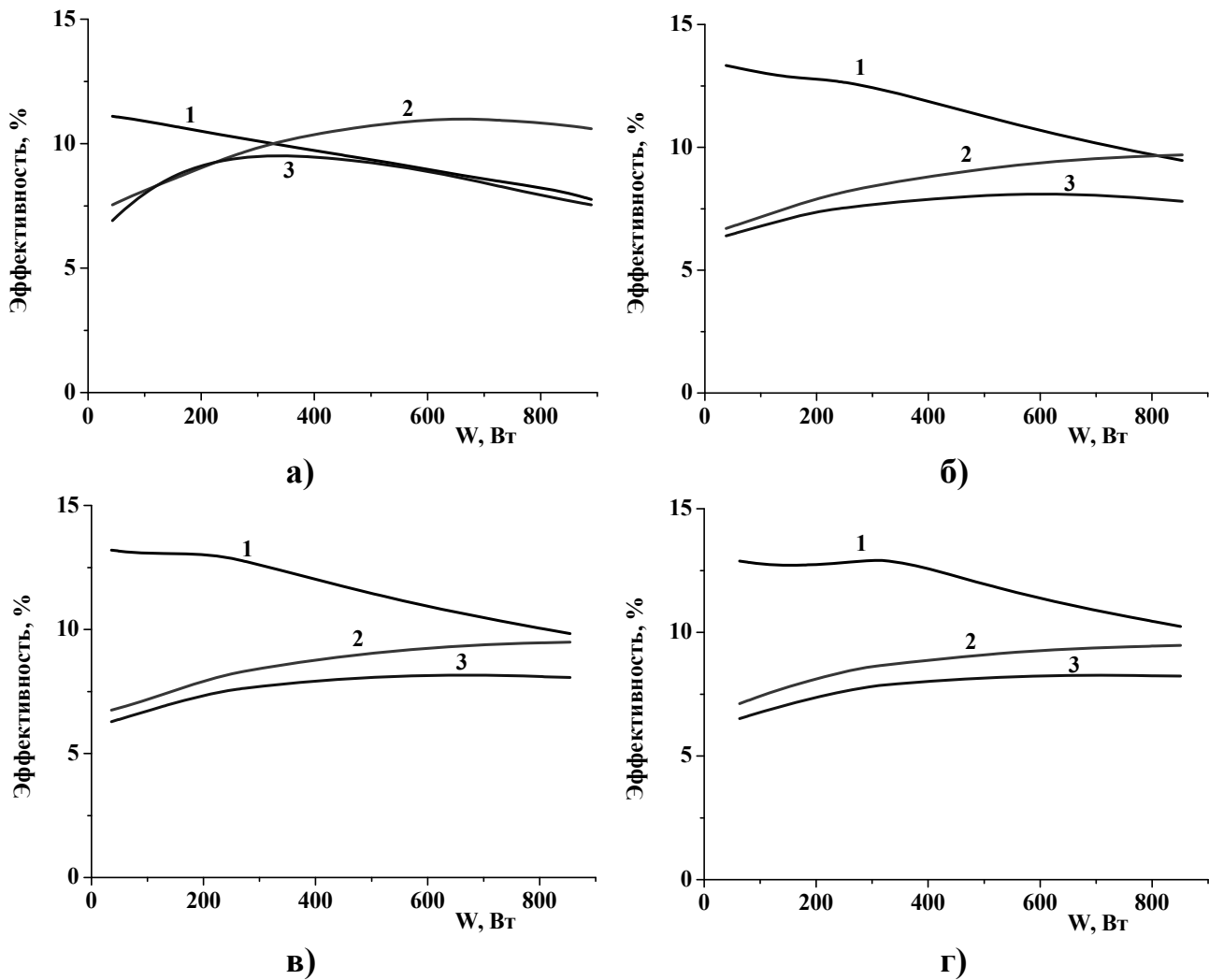
Важной величиной, определяющей основные характеристики кислородно-йодного лазера, является выход СК (Y), который определяется как отношение концентрации СК к суммарной концентрации молекулярного кислорода в

основном состоянии и СК. Рис. 8 (а-г) показывают зависимость выхода СК от мощности разряда. Выход СК при мощности разряда 800 Вт составляет около 10%.



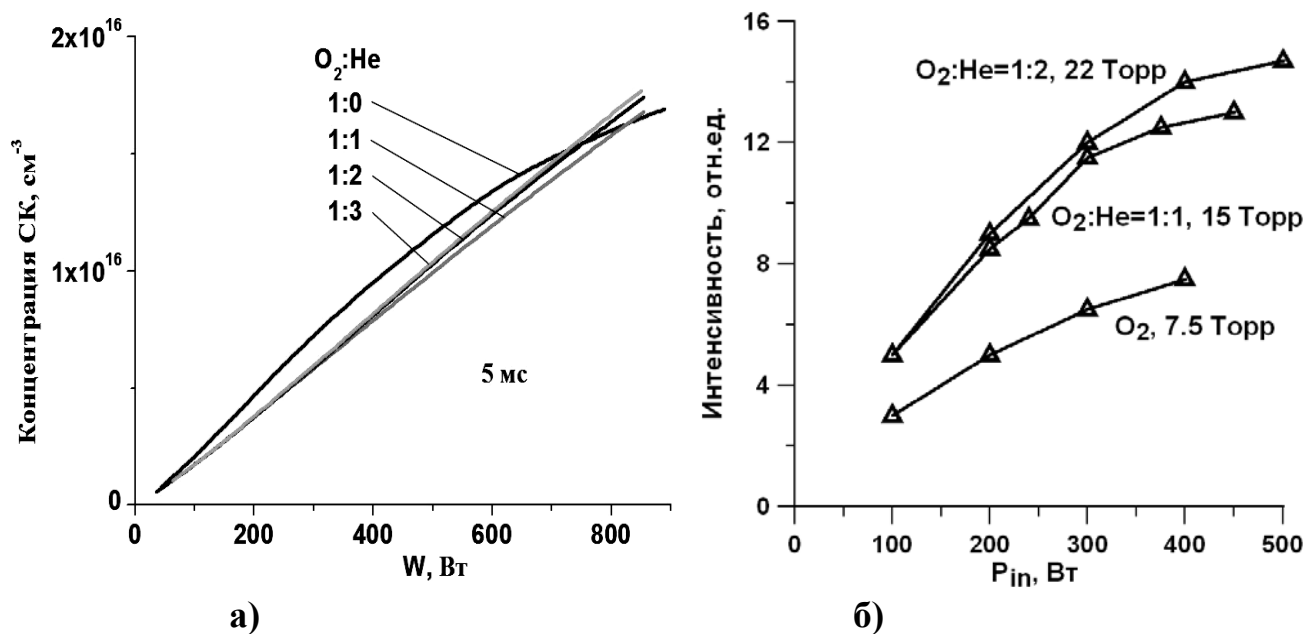
**Рис. 8.** Зависимость выхода СК от мощности разряда в моменты времени 1 мс (1), 2 мс (2) и 5 мс (3) от начала разряда для смесей  $O_2:He=1:0$  (а),  $1:1$  (б),  $1:2$  (в),  $1:3$  (г). Парциальное давление  $O_2$  во всех смесях  $P=7.5$  Торр,  $T_0 = 300$  К.

Эффективность образования СК определяется как отношение энергии, запасённой в СК, к энергии, вложенной в разряде. Зависимость эффективности образования СК от мощности разряда для разных смесей представлена на Рис. 9 (а-г). Величина эффективности оказывается порядка 10% и слабо зависит от давления и состава газовой смеси.



**Рис. 9.** Зависимость эффективности образования СК от мощности разряда в моменты времени 1 мс (1), 2 мс (2) и 5 мс (3) от начала разряда для смесей O<sub>2</sub>:He=1:0 (а), 1:1 (б), 1:2 (в), 1:3 (г). Парциальное давление O<sub>2</sub> во всех смесях P=7.5 Торр, T<sub>0</sub> = 300 К.

Для сравнения расчетных и экспериментальных данных, из работы [13] были взяты параметры газового потока, условия его возбуждения и охлаждения, геометрия разрядной системы. С помощью уточненной модели были рассчитаны концентрации СК в условиях этих экспериментов (рис.10а). На рис 10б для сравнения представлены аналогичные экспериментальные зависимости интенсивности люминесценции СК из работы [13] для разных смесей с одинаковым парциальным давлением кислорода (что в этих условиях эквивалентно концентрации (и выходу) СК).



**Рис.10.** Расчетные (а) и экспериментальные (б) зависимости концентрации СК для одинаковых начальных условий. Рисунок (б) взят из [13].

Из рис.10б видно, что разбавление кислорода гелием в эксперименте дает существенное увеличение интенсивности люминесценции (концентрации) СК – при мощности ВЧ накачки  $\sim 400$  Вт это увеличение составляет до 2 раз. Моделирование же процесса наработки СК для тех же условий (рис.10а) такого выигрыша по концентрации СК при разбавлении кислорода гелием не показывает.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как было неоднократно показано в экспериментальных и расчетных работах, выход СК в электроразрядных генераторах СК различных типов (в том числе и на основе ВЧ разряда) может достигать уровня 10-15%. В этих условиях, помимо вопросов получения атомарного йода и его однородного смешения с возбужденным газовым потоком, на первый план выходит задача максимального снижения поступательной температуры газа в зоне лазерной генерации. С этой точки зрения целевой поперечный ВЧ разряд с криогенным охлаждением электродной системы выглядит весьма привлекательным для построения электроразрядных кислород-йодных лазеров на его основе и требует дальнейших экспериментов и верификации расчетной модели.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 12-02-00013).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., et al, *Appl. Phys. Lett.*, v.85, p.1320 (2004).
2. Carroll D.L., Verdeyen J.T., King D.M., et al, *Appl. Phys. Lett.*, v.86, p.111104 (2005).
3. Benavides G.F., Zimmerman J.W., Woodard B.S., et al, *Appl. Phys. Lett.*, v.92, p. 041116 (2008).
4. Carroll D.L., Verdeyen J.T., Benavides G.F., et al, *AIAA Paper 2008-4008*, (2008).
5. Zimmerman J. W., Woodard B. S., Benavides G. F., Carroll D.L., et al, *Appl. Phys. Lett.*, v.92, p. 241115 (2008).
6. Zimmerman J.W., Woodard B.S., Verdeyen J.T., Carroll D.L., et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v.41, p.195209 (2008).
7. Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v.39, p.5183 (2006).
8. Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v.40, p.6571 (2007).
9. Braginsky O.V., Kovalev A.S., Lopaev D.V., et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.* v.41, p.172008 (2008).
10. Carroll D.L., Benavides G.F., Woodard B.S., et al, *Proc. SPIE*, v.8238, p.823803 (2012).
11. Ionin A.A., Napartovich A.P., Konev Yu.B., et al, *Final Project Technical Report of ISTC Project 2415*, Moscow (2006).
12. Ionin A.A., Frolov M.P., Ochkin V.N., et al, *Proc. SPIE*, v.6101, p.61011X (2006).
13. Ионин А. А., Климачев Ю. М., Кочетов И. В., и др, Препринт ФИАН им. П. Н. Лебедева, № 14 (2009).
14. Ionin A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P. and Yuryshv N.N., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v.40, p.R25-R61 (2007).



15. Ionin A. A., Klimachev Yu.M., Kozlov A.Yu., et al, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, v.42, p.015201 (2009).
16. Дятко Н. А., Кочетов И. В., Напартович А. П., Таран М. Д., *ТВТ*, т.22, с.1048 (1984).
17. Dixon A. J., Harrison M. F. A., Smith A. C. H., *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, v.9, p.2617 (1976).
18. Florescu-Mitchell A. I., Mitchell J. V. A., *Phys. Rep.*, v.430, p.277 (2006).
19. Ионих Ю.З., Чернышева Н.В., в “Справочник констант элементарных процессов с участием атомов, ионов, электронов, фотонов”, под ред. А. Г. Жиглинского, Санкт-Петербург: изд. С.-Петербургского университета, с.143, 1994.
20. Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А., *Химия плазмы*. М.: Энергоатомиздат, вып. 15, с.127 (1989).
21. Вирин Л.И., Джагацпаян Р.В., Карачевцев Г.В., Потапов В.К., Тальрозе В.Л., «Ионно-молекулярные реакции в газах», М.: Наука, 1979.
22. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З., *Справочник «Физические величины»*, Энергоатомиздат, Москва, 1991.

Подписано в печать 11.01.2013 г.  
Формат 60x84/16. Заказ №2. Тираж 140 экз. П.л 1,0.  
Отпечатано в РИИС ФИАН с оригинал-макета заказчика  
119991 Москва, Ленинский проспект, 53. Тел. 499 783 3640