

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

16

А.А. ИОНИН, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ,
О.А. РУЛЕВ, Л.В. СЕЛЕЗНЕВ,
Д.В. СИНИЦЫН

**ИМПУЛЬСНЫЙ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫЙ
СО-ЛАЗЕР НА КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ
ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ**

МОСКВА 2007

Импульсный электроионизационный СО-лазер на кислородсодержащих газовых смесях

А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков,
О.А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В. Синицын

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский проспект 53,
Тел. (495)132-62-30, тел./факс. (495)132-04-25, e-mail: aion@sci.lebedev.ru*

Обнаружено, что при высоком содержании кислорода в рабочей смеси импульсного электроионизационного (ЭИ) СО-лазера в лазерной среде увеличивается пиковое значение коэффициента усиления слабого сигнала (КУСС) на основных колебательных переходах $V+1 \rightarrow V$ для V от 6 до 13. Показано, что такое увеличение КУСС связано с увеличением населенности колебательных уровней. На высоких колебательных переходах $V > 17$ добавление O_2 только уменьшало КУСС. Временные параметры динамики КУСС на всех переходах уменьшались при увеличении содержания O_2 . Наблюдаемые изменения временной динамики КУСС объясняются на основе кинетических процессов VV -обмена между молекулами СО и O_2 . Продемонстрировано, что при увеличении содержания O_2 уменьшается пороговый энерговклад для импульсного ЭИ СО-лазера, действующего, как на основных, так и на обертоновых переходах. Кроме того, при этом увеличивается максимальное значение КПД такого СО-лазера, а максимум КПД достигается при меньших значениях энерговклада, причем этот лазер может эффективно действовать на воздушной рабочей смеси.

Pulsed Electron-Beam Sustained Discharge CO-Laser With Oxygen Containing Gas Mixtures

A.A. Ionin, Yu.M. Klimachev, A.Yu. Kozlov, A.A. Kotkov,
O.A. Rulev, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn

*P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, 53 Leninsky prospect, 119991, Moscow,
Russia, phone: 7(495) 132-62-30, phone/fax: 7(495) 132- 04-25, e-mail: aion@sci.lebedev.ru*

It is found that a peak value of small signal gain (SSG) on fundamental vibrational transitions $V+1 \rightarrow V$, where V changes from 6 up to 13, increases in active medium of e-beam sustained discharge (EBSD) CO-laser at addition of oxygen into working gas mixture. Such SSG increase is shown to be connected with an enhancement of vibrational population. The SSG value on high vibrational transition $V > 17$ only decreases at addition of O_2 . All temporal parameters of SSG time behavior for all transitions decreases when O_2 content increases. The observed changes of SSG time behavior are explained by taking into consideration kinetics processes of VV -exchange between CO and O_2 molecules. The threshold energy input is demonstrated to decrease at addition of O_2 for pulsed EBSD CO-laser operating on either fundamental or overtone transitions. Besides, the peak value of the laser efficiency increases and maximum laser efficiency is observed at lower specific energy input. It is shown that pulsed EBSD CO-laser can effectively operate on air-containing gas mixture.

1. Введение

Лазер на окиси углерода [1-4] обладает высокими энергетическими характеристиками в среднем ИК диапазоне спектра. В газовом разряде при электронном ударе возбуждаются самые нижние колебательные уровни ($V = 1 \div 8$) молекулы CO [5]. Заселение более высоких колебательных уровней происходит путем колебательно-колебательного (VV) обмена энергией между молекулами [6-10]. Усиление излучения в активной среде электроразрядного СО-лазера осуществляется при отсутствии абсолютной инверсной населенности колебательных уровней. Частичная инверсная населенность возникает на колебательно-вращательных переходах P -ветви колебаний молекулы CO в области «плато» [7, 8] колебательной функции распределения (КФР). Электроразрядный СО-лазер может действовать на множестве (~ 1000) колебательно-вращательных переходов молекулы CO, как в полосе основных колебательных переходов ($V+1 \rightarrow V$, длина волны λ от 4.7 до 8.3 мкм [11, 12]), так и в полосе первого колебательного обертона ($V+2 \rightarrow V$, λ от 2.5 до 4.2 мкм [13-15]). Эффективность преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения (далее КПД) при криогенном охлаждении активной среды СО-лазера, действующего в режиме свободной генерации, может превышать $\sim 35\%$ (см., например, [16-20]) на основных и $\sim 15\%$ [13, 15, 21] на обертоновых колебательных переходах.

Влияние состава рабочей смеси газов, в частности содержание молекул кислорода, на генерационные характеристики СО-лазера подробно исследовалось для непрерывных СО-лазеров низкого давления, накачиваемых разрядом постоянного тока. Дело в том, что добавление в рабочую смесь CO:N₂:He небольшого количества кислорода (при соотношении концентраций молекул $X=[O_2]/[CO]=0.001 \div 0.1$) увеличивает мощность излучения и КПД непрерывного СО-лазера [16, 22]. Отчасти это связано с тем, что потенциал ионизации U_e для молекул O₂ ($U_e=12.1$ эВ) меньше, чем для молекул CO ($U_e=14.0$ эВ). Поэтому в кислородсодержащих смесях основным поставщиком электронов при самостоятельном разряде становятся молекулы кислорода [23], а концентрация рабочих (нейтральных) молекул CO при этом практически не уменьшается.

Наряду с этим, присутствие кислорода влияет на плазмохимические процессы, происходящие в смеси при самостоятельном разряде. Например, в рабочей смеси CO:He, в которой кислород отсутствует, диссоциация молекул CO происходит настолько интенсивно, что становится трудно осуществить генерацию излучения непрерывного CO-лазера [24, 25]. Кроме того, в разряде образуются молекулы C₂, CN, C₂O, C₃O₂ и др., которые способны существенно изменить КФР молекул CO [26-28], снижая энергетические характеристики лазера. Добавление кислорода в газовую смесь уменьшает концентрацию таких молекул. В работе [28] было показано, что населенность колебательных уровней N_V молекулы CO для $V = 4 \div 26$ может увеличиваться в несколько раз при изменении содержания кислорода X от 0 до ~ 0.001 . Разнообразные механизмы, которые были предложены, чтобы объяснить увеличение N_V при добавлении кислорода в рабочую смесь CO-лазера, обсуждаются в работах [29-31]. При дальнейшем увеличении X от ~ 0.001 до ~ 0.1 изменение КФР происходило преимущественно на высоких колебательных уровнях $V > 20$, на которых населенность только уменьшалась [28].

Максимальное содержание кислорода X в рабочей смеси CO-лазеров низкого давления составляло 0.1, что связано с процессами образования молекул CO₂, которые дезактивируют колебательно возбужденные состояния молекул CO [32-35]. Образование в разряде молекул CO₂ наиболее существенно влияет на энергетические характеристики отпаянных (без замены смеси) CO-лазеров низкого давления с водяным охлаждением [2]. Поэтому для таких лазеров рабочая смесь CO:N₂:He:Xe готовится из газов особой чистоты с содержанием примесей менее 0.001% [2], и кислород в такую смесь не добавляется, поскольку его заменяет легкоионизируемый газ ксенон ($U_e = 12.1$ эВ). Эффективность CO-лазера значительно увеличивается при охлаждении лазерной среды жидким азотом [16], однако ксенон, имеющий высокую температуру конденсации, быстро осаждается на стенках криогенного теплообменника. Поэтому при криогенном охлаждении рабочей смеси непрерывного CO-лазера низкого давления приходится использовать кислородсодержащие смеси и обеспечивать регулярную замену или прокачку смеси. При этом следует учитывать, что на охлаждаемой поверхности осаждается взрывоопасная смесь [36] образовавшихся в разряде молекул – озон, окислы азота и др.

В электроионизационных (ЭИ) лазерах [37, 38], в которых ионизация газа обеспечивается внешним ионизатором, можно использовать рабочие смеси при повышенном давлении газа, причем необходимость вводить в состав рабочей смеси легкоионизируемые добавки отпадает. При криогенном охлаждении активной среды ЭИ СО-лазеров вещества, образовавшиеся в разряде, осаждаются на поверхности теплообменника, а при сверхзвуковом охлаждении рабочей смеси [39-45] молекулы таких веществ выносятся потоком газа. Поэтому в рабочую смесь криогенных ЭИ СО-лазеров кислород обычно не добавляют. С другой стороны, оказалось, что, наоборот, добавление СО стабилизирует ЭИ разряд в кислородсодержащих смесях, используемых для наработки синглетного кислорода, в которых содержание кислорода X принимает значения от 4 до 100 [46-48]. Причем в смеси $\text{CO}:\text{O}_2=1:19$, накачиваемой импульсным ЭИ разрядом, населенность колебательных уровней молекулы СО оказалась во много раз больше (для уровня $V=9$ примерно в 13 раз [49]), чем в обычной рабочей смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}:\text{Ar}$. На смеси $\text{CO}:\text{Ar}:\text{O}_2=1:10:10$ была получена генерация излучения импульсного ЭИ СО-лазера [48, 50]. Более того, было показано, что КПД импульсного ЭИ СО-лазера на смеси с большим содержанием кислорода ($X \sim 10$) может в полтора-два раза превышать КПД лазера на обычной лазерной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{He}:\text{Ar}$ [20]. За исключением наших работ [20, 48-52], свойства активной среды импульсных ЭИ СО-лазеров с большим содержанием кислорода ($X > 0.5$) ранее не исследовались.

Активная среда СО-лазера является многоуровневой системой, и генерационные характеристики СО-лазера связаны с неравновесными процессами заселения и дезактивации множества колебательных уровней. Основным методом исследования свойств такой многоуровневой среды заключается в изучении коэффициента усиления слабого сигнала (КУСС) на колебательно-вращательных переходах молекулы СО. Кроме того, во временной динамике КУСС после импульсной накачки лазерной среды проявляются кинетические процессы, происходящие при обмене колебательной энергией между молекулами [20, 53, 54]. Чтобы понять, как влияет кислород на свойства активной среды импульсного СО-лазера, в настоящей работе был проведен анализ временной динамики КУСС в широком диапазоне колебательных переходов. Цель работы заключалась в том, чтобы выяснить, как изменяется

временная динамика КУСС на колебательно-вращательных переходах молекулы СО в активной среде криогенного лазерного усилителя, накачиваемой импульсным ЭИ разрядом, при добавлении в рабочую смесь молекулярного кислорода, а также сравнить энергетические характеристики импульсного ЭИ СО-лазера при различном составе рабочей смеси СО:О₂:N₂:He, включая смесь СО:Воздух.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на импульсной ЭИ лазерной установке с длиной активной среды $L=1.2$ м, подробно описанной в [55]. Рабочая смесь газов СО:He:O₂ = 1:4: X или СО:N₂:O₂ = 1:9: X охлаждалась жидким азотом через боковые стенки разрядной камеры. Начальная температура газа в исследуемой части активной среды перед импульсом разряда была равна $T_0 \approx 120$ К (если не указывается иное значение). Кислород добавлялся в исходные газовые смеси ($X=0$), при этом относительная плотность газа N_g в разрядной камере изменялась от 0.10 до 0.18 Амага (1 Амага – это плотность газа при нормальных условиях). Длительность импульса ЭИ разряда составляла 0.04 мс. Среднее значение удельного энерговклада Q_{in} , которое характеризует импульсную накачку газовой среды, изменялось в экспериментах от 20 до 400 Дж/(л Амага).

Измерение временной динамики КУСС в активной среде импульсного лазерного усилителя проводилось методом лазерного зондирования, который подробно описан в [55]. Для измерения КУСС зондирующее излучение направлялось вдоль оси разрядной камеры усилителя при позиционировании зондирующего лазерного пучка (диаметром ~ 1 см) в середине межэлектродного промежутка, который имел зазор между электродами 9 см при ширине разрядной области 16.5 см. В качестве зондирующего лазера применялся непрерывный частотно-селективный СО-лазер низкого давления, накачиваемый газовым разрядом постоянного тока, при криогенном охлаждении газовой смеси [55]. Зондирующий СО-лазер действовал в полосе основных колебательных переходов на более чем 200 спектральных линиях. Лазерное зондирование активной среды усилителя проводилось на линиях P -ветви колебательных переходов с номером V от 4 до 23. Для изучения временной динамики КУСС в каждом из исследовавшихся колебательных переходов были выбраны линии с близкими значениями вращательного квантового числа J от 13 до 15. Выбор

линий зондирования был ограничен требованием селективной генерации излучения в зондирующем СО-лазере на одной спектральной линии, что осложнялось из-за высокой плотности спектральных линий молекулы СО и конкуренции между линиями из разных колебательных полос. Спектр излучения зондирующего СО-лазера контролировался с помощью спектрометра ИКС-31, оснащенного микрокриогенным фотоприемником (Ge : Au). Интенсивность зондирующего лазерного пучка (не более 1 Вт см^{-2}) была много меньше интенсивности насыщения усиления ($\sim 10^2 \text{ Вт см}^{-2}$ [56]) в активной среде импульсного лазерного усилителя. Сигналы с фотодетекторов РЕМ-L-3 (Hg-Cd-Zn-Te), пропорциональные интенсивности зондирующего и усиленного излучения, регистрировались осциллографом Tektronix TDS2014, затем на основе анализа этих сигналов рассчитывалась величина КУСС $G(t)$.

3. Временная динамика КУСС

3.1. Исходная гелиевая смесь СО:Не

На **Рис. 1** представлена временная динамика КУСС $G(t)$ на пяти колебательно-вращательных переходах (по одному переходу в колебательной полосе $V+1 \rightarrow V$) в исходной гелиевой смеси СО:Не = 1:4 при удельном энергокладе $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж/(л Амага)}$. Момент времени, равный нулю $t=0$, соответствует началу импульса накачки в лазерном усилителе. После начала накачки зондирующее излучение сначала поглощается ($G(t)<0$), поскольку колебательные уровни только начинают заселяться. Затем, после возникновения инверсной населенности на колебательно-вращательном переходе, появляется усиление излучения ($G(t)>0$), которое быстро нарастает до максимального значения G_{max} , а потом медленно спадает. При малой скорости релаксации колебательной энергии молекул СО, время существования усиления (ВСУ), т.е. интервал времени, на протяжении которого $G(t)>0$, для рассматриваемых переходов значительно превосходит длительность импульса накачки.

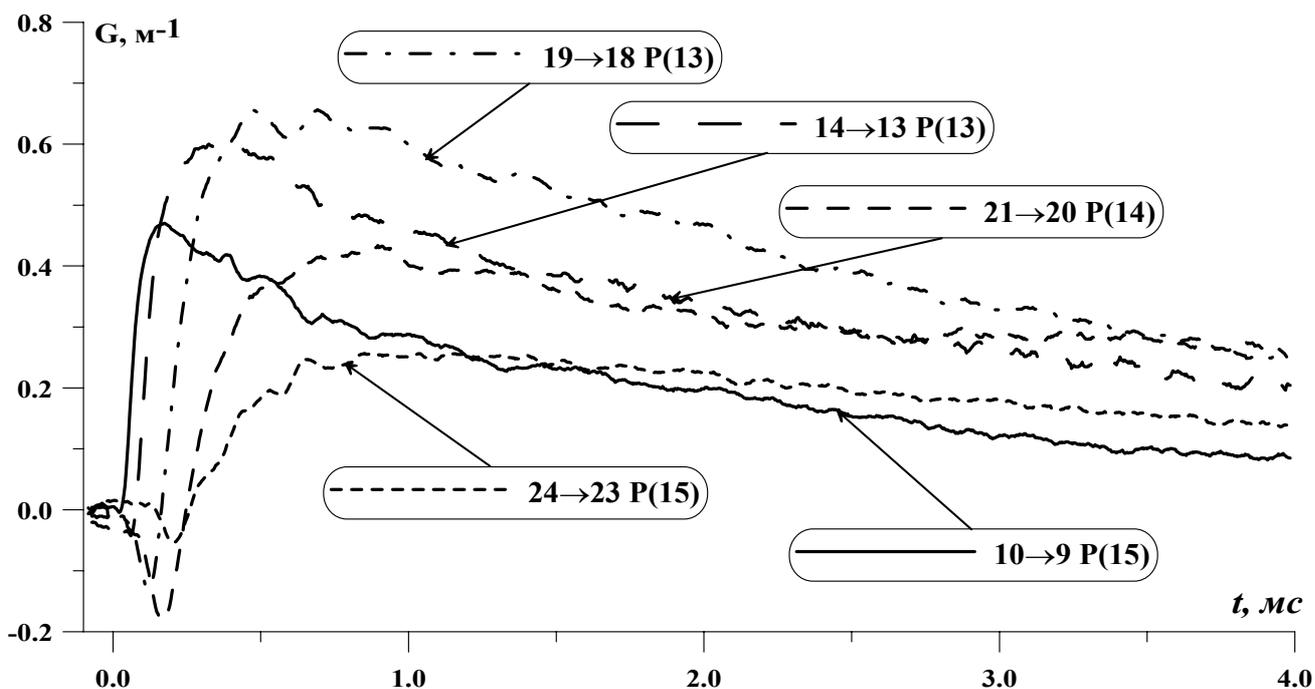


Рис.1. Временная динамика КУСС на переходах $10 \rightarrow 9 \text{ P}(15)$, $14 \rightarrow 13 \text{ P}(13)$, $19 \rightarrow 18 \text{ P}(13)$, $21 \rightarrow 20 \text{ P}(14)$, $24 \rightarrow 23 \text{ P}(15)$ для смеси $\text{CO}:\text{He} = 1:4$ при удельном энергокладе $Q_{\text{in}} = 130 \text{ Дж}/(\text{л Амага})$.

Чтобы охарактеризовать временную динамику КУСС введем следующие временные параметры:

τ_{01} - момент времени, когда КУСС на исследуемом переходе первый раз достигает значения $0.1 G_{\text{max}}$.

τ_{09} - момент времени, когда КУСС первый раз достигает значения $0.9 G_{\text{max}}$.

$\Delta_{\phi} = \tau_{09} - \tau_{01}$ - время нарастания усиления или, точнее, интервал времени, в течение которого КУСС увеличивается от $0.1 G_{\text{max}}$ до $0.9 G_{\text{max}}$.

Δ_{01} - временной интервал, в течение которого значение КУСС превышает уровень 0.1 от максимума усиления $G(t) > 0.1 G_{\text{max}}$.

Δ_{05} - временной интервал, в течение которого значение КУСС превышает половину от максимума усиления $G(t) > 0.5 G_{\text{max}}$.

На **Рис. 2** представлено время τ_{09} в зависимости от колебательного числа V при трех значениях удельного энерговклада $Q_{in} = 130, 240$ и 300 Дж/(л Амага). При увеличении числа V временные параметры τ_{09} , Δ_{ϕ} и Δ_{05} возрастали. В частности при удельном энерговкладе $Q_{in} = 130$ Дж/(л Амага) временной параметр Δ_{ϕ} увеличивался от 0.09 мс для $V=9$ до 0.42 мс для $V=23$, а параметр Δ_{05} - от 1.2 мс до 3.8 мс, соответственно. При увеличении удельного энерговклада Q_{in} максимальное значение усиления G_{max} возрастало почти пропорционально величине Q_{in} (**Рис. 3**).

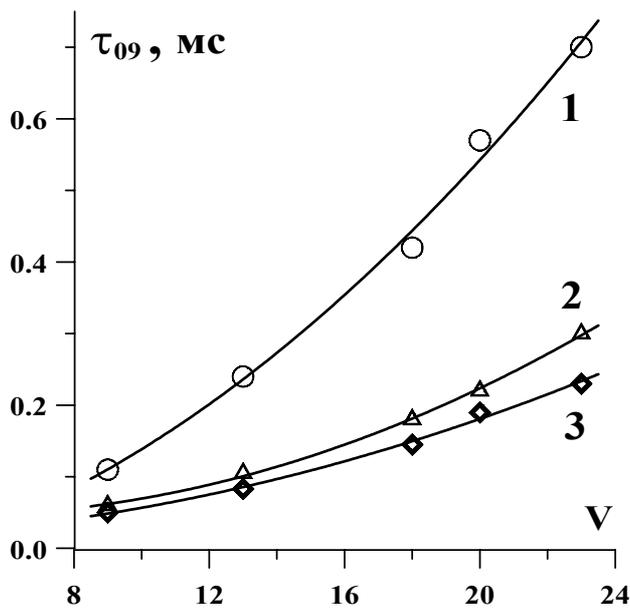


Рис.2. Зависимость времени τ_{09} от колебательного числа V для трех значений удельного энерговклада Q_{in} : 1) 130, 2) 240 и 3) 300 Дж/(л Амага). Смесь СО:Не=1:4, $N_g=0.10$ Амага.

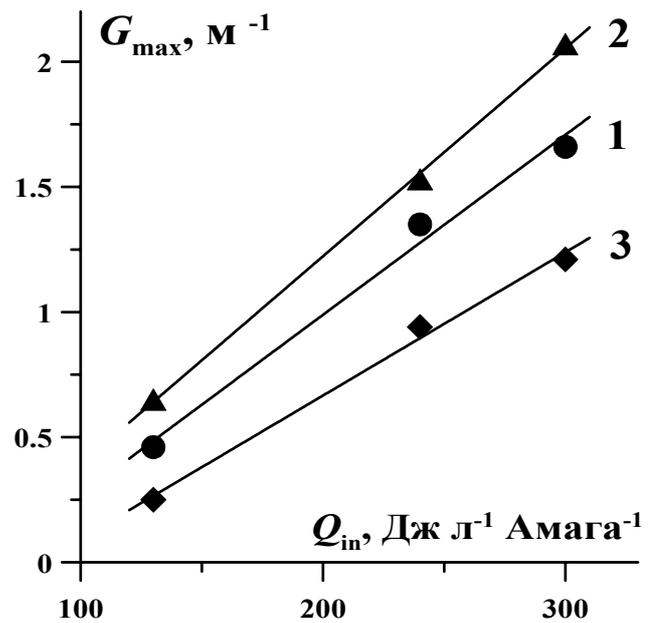


Рис.3. Зависимость максимума КУСС G_{max} от удельного энерговклада Q_{in} для трех колебательно-вращательных переходов: 1) 10→9 P(15), 2) 19→18P(13) и 3) 24→23P(15). Смесь СО:Не=1:4, $N_g=0.10$ Амага.

На самых нижних колебательных переходах ($6 \rightarrow 5$ и ниже) излучение зондирующего СО-лазера не усиливалось, а только поглощалось ($G < 0$). Например, на колебательно-вращательном переходе $5 \rightarrow 4$ P(10) длительность импульса поглощения излучения, измеренная по уровню $G(t) < -1$ м⁻¹, составляла 15 мс при $Q_{in}=130$ Дж/(л Амага) и увеличивалась до 20 мс при $Q_{in}=230$ Дж/(л Амага).

3.2. Кислородсодержащие гелиевые смеси

При добавлении кислорода в рабочую смесь импульсного ЭИ СО лазерного усилителя временная динамика КУСС $G(t)$ изменялась различным образом в зависимости от номера V зондируемого колебательного перехода $V+1 \rightarrow V$. По характеру воздействия кислорода на величину КУСС зондировавшиеся переходы можно условно разделить на следующие группы:

- «высокорасположенные» переходы (V больше 17), для которых добавление кислорода приводило к снижению значений максимального КУСС;
- «низкорасположенные» переходы (V от 6 до 13), для которых значения максимального КУСС, наоборот, возрастали при добавлении кислорода;
- «промежуточные» переходы (V от 14 до 17), для которых изменение значений максимального КУСС (увеличение или уменьшение) зависело от содержания кислорода в газовой смеси.

3.2.1. «Высокорасположенные» переходы

Добавление в исходную смесь небольшого количества кислорода (X от 0 до 0.02) приводило к резкому уменьшению КУСС на «высокорасположенном» колебательном переходе $24 \rightarrow 23$ (**Рис. 4а**). При увеличении X от 0 до 0.01 максимальное значение усиления G_{\max} на линии $24 \rightarrow 23$ P(15) уменьшалось почти в два раза от 0.25 м^{-1} до 0.12 м^{-1} при $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж/(л Амага)}$. При том же энергокладе для $X=0.02$ излучение зондирующего лазера не усиливалось, а только поглощалось ($G < 0$). Чтобы сравнивать значения КУСС как при усилении излучения, так и при его поглощении, введем величину G_{peak} , которая при наличии усиления равна пиковому (максимальному) значению КУСС $G_{\text{peak}}=G_{\max} > 0$, а при поглощении - пиковому значению коэффициента поглощения ($G_{\text{peak}} < 0$). Изменение значений G_{peak} в зависимости от содержания кислорода X представлено на **Рис. 4,б** для трех значений энергоклада Q_{in} . При $Q_{\text{in}}=300 \text{ Дж/(л Амага)}$ значение $G_{\text{peak}}=G_{\max}$ уменьшалось от 1.2 м^{-1} для $X=0$ до 0.9 м^{-1} для $X=0.02$. Среди временных параметров, характеризующих динамику КУСС, при добавлении кислорода наиболее значительно изменялся параметр Δ_{05} , который при $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж/(л Амага)}$ сокращался почти в два раза (см.

Рис. 4,а) от 3.8 мс для $X=0$ до 2.0 мс для $X=0.01$. При тех же условиях параметры τ_{09} и Δ_{ϕ} изменились незначительно: τ_{09} был равен 0.62 мс для $X=0$ и 0.63 мс для $X=0.01$, а параметр Δ_{ϕ} равнялся 0.38 мс и 0.35 мс, соответственно.

Значения КУСС на переходах 21→20 P(14) (**Рис.5**) и 19→18 P(13) (**Рис.6**) также уменьшались при добавлении кислорода в рабочую смесь лазерного усилителя. На **Рис. 5,б** и **Рис. 6,б** представлено изменение соответствующих пиковых значений G_{peak} при трех значениях энерговклада Q_{in} . При энерговкладе $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) значения $G_{\text{peak}}=G_{\text{max}}>0$ на переходе 21→20 P(14) уменьшались от 0.44 м^{-1} для $X=0$ до 0.14 м^{-1} для $X=0.05$, причем в смесях с содержанием кислорода $X>0.05$ излучение не усиливалось, а только поглощалось ($G_{\text{peak}}<0$). При тех же условиях накачки усиление излучения на ниже расположенном переходе 19→18 P(13) не возникало в смесях с более высоким содержанием кислорода $X>0.22$. Следует отметить, что для $X=0.22$ после завершения импульса усиления ($G_{\text{peak}}=G_{\text{max}}=0.30 \text{ м}^{-1}$, $\Delta_{01} = 0.38$ мс) на временном интервале от $t\approx 0.6$ мс до $t\approx 4$ мс величина КУСС принимала отрицательные значения ($G(t) < 0$). Увеличение количества кислорода в активной среде лазерного усилителя приводило к уменьшению параметра Δ_{05} , который сокращался при $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) на переходе 21→20 P(14) от 4 мс для $X=0$ до 1.2 мс для $X=0.05$, а на переходе 19→18 P(13) от 2.7 мс для $X=0$ до 0.30 мс для $X=0.22$. При этом временные параметры τ_{09} и Δ_{ϕ} на переходе 21→20 P(14) практически не менялись - $\tau_{09}=0.60$ мс $\Delta_{\phi} = 0.35$ мс для содержания кислорода $X=0$ и $X=0.05$. На переходе 19→18 P(13) те же параметры уменьшались: τ_{09} был равен 0.40 мс для $X=0$ и 0.30 мс для $X=0.1$ и $X=0.22$, а Δ_{ϕ} был равен 0.22 мс и 0.11 мс, соответственно.

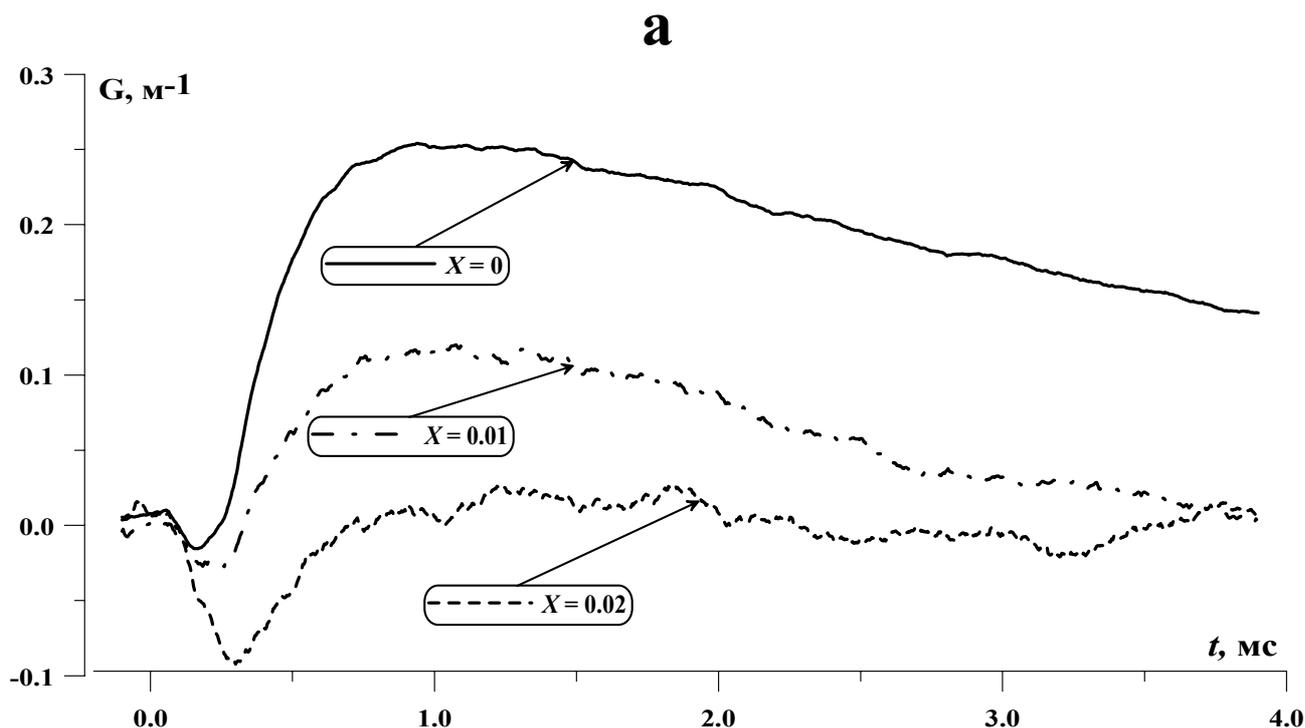
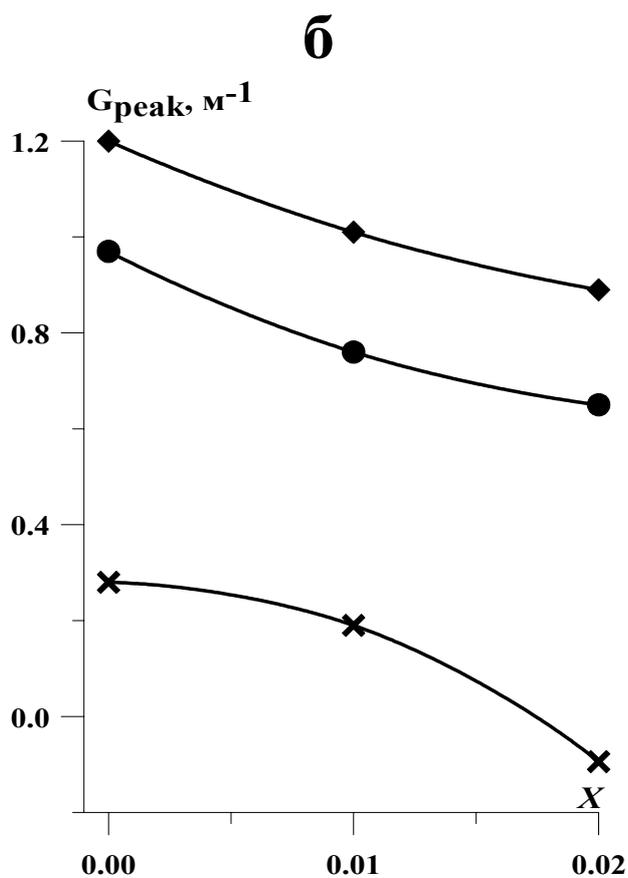
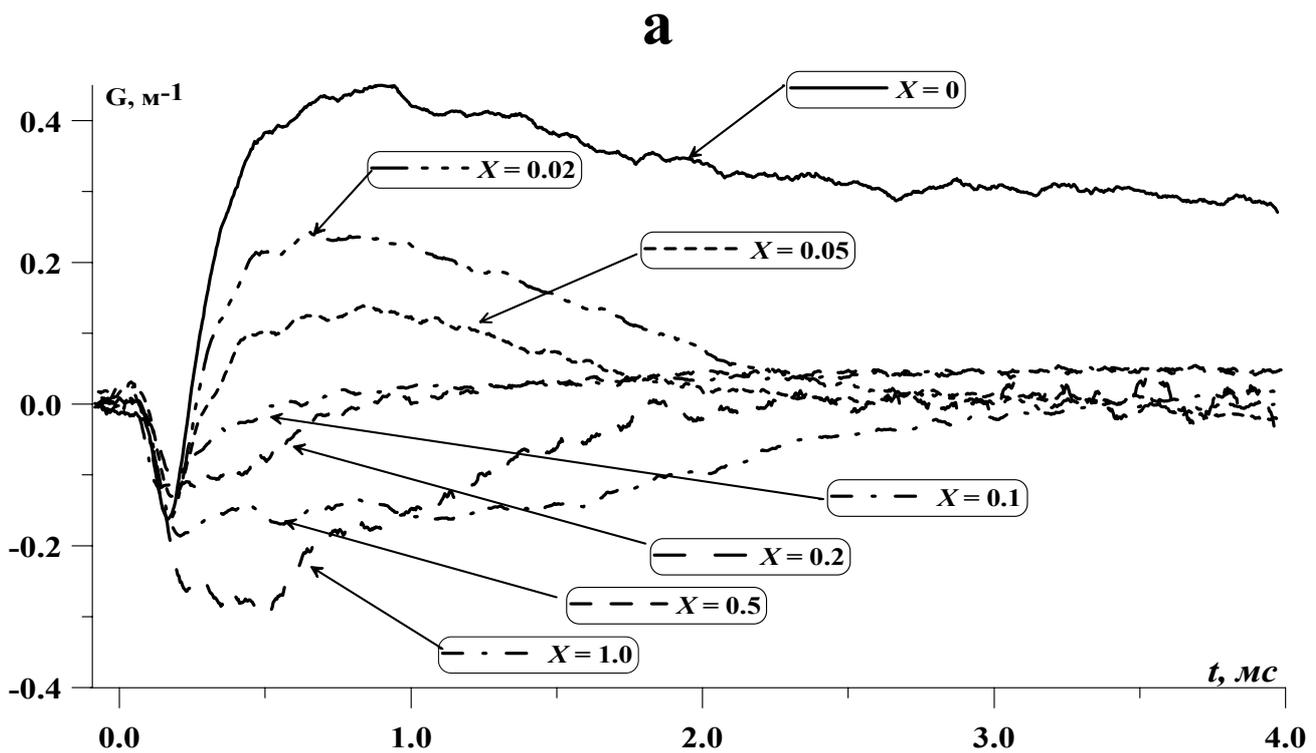


Рис.4. Переход 24→23 P(15)

а) - Временная динамика КУСС для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при трех значениях X , удельный энерговклад $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость пикового значения КУСС G_{peak} от содержания кислорода X для $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) (\times), $Q_{\text{in}}=240$ Дж/(л Амага) (\bullet) и $Q_{\text{in}}=300$ Дж/(л Амага) (\blacklozenge).





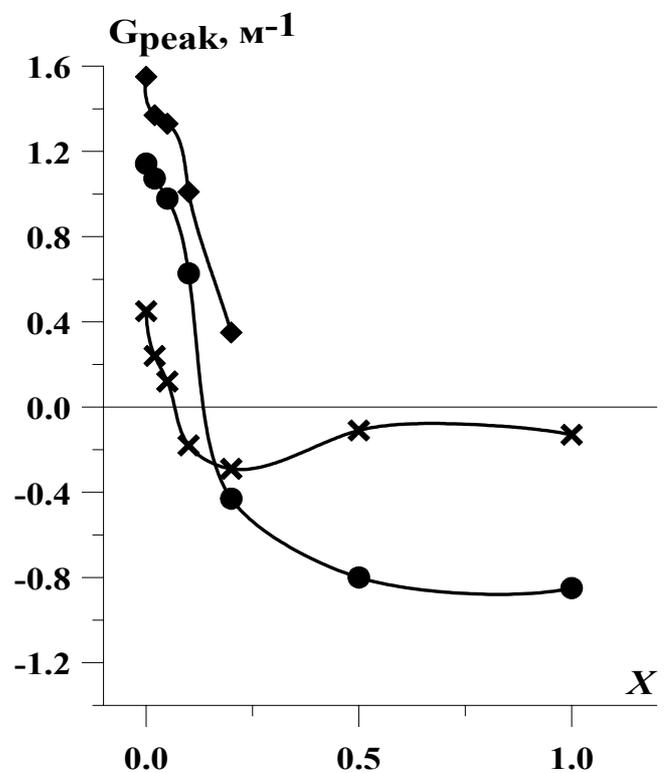
б

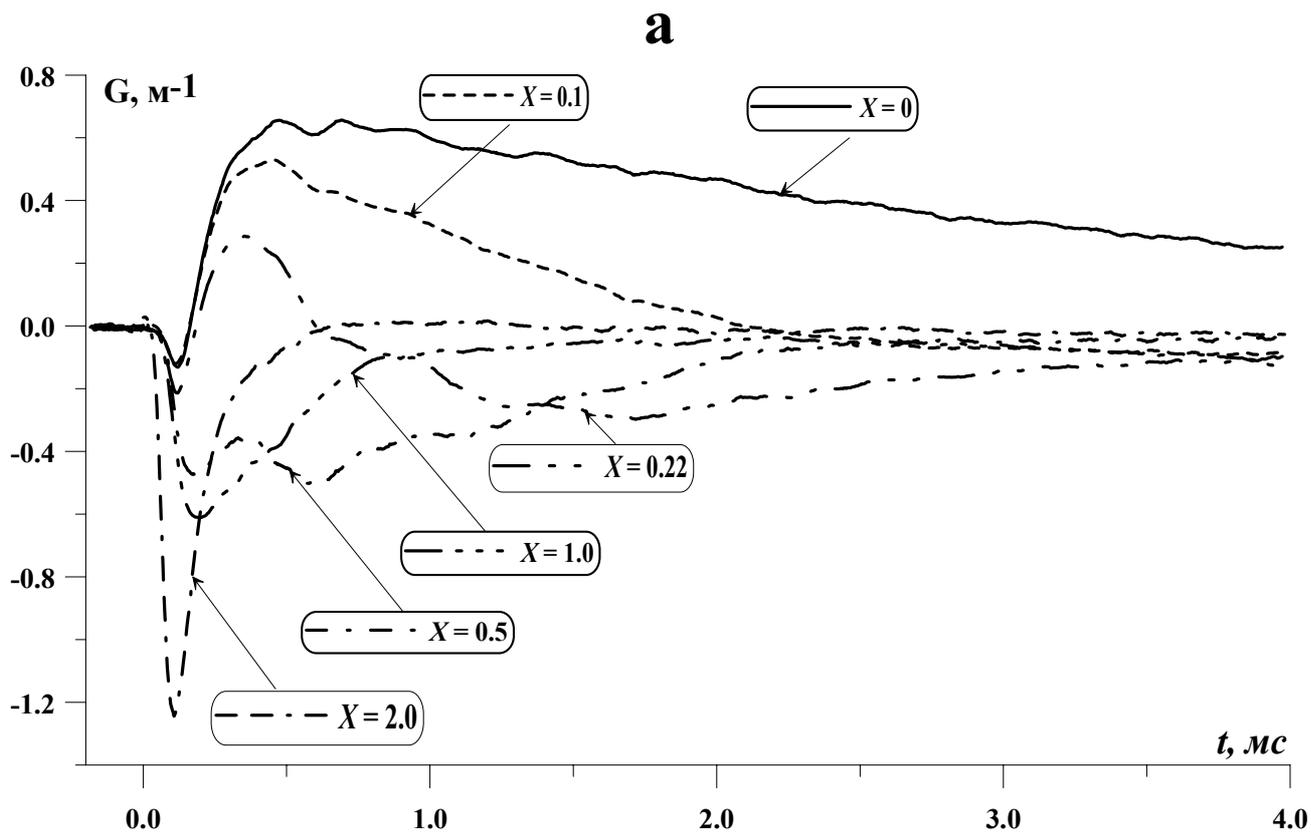
Рис.5. Переход 21→20 P(14)

а) - Временная динамика КУСС для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при семи значениях X , удельный энерговклад $Q_{\text{in}} = 130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость пикового значения КУСС G_{peak} от содержания кислорода X для

$Q_{\text{in}} = 130$ Дж/(л Амага) (\times),
 $Q_{\text{in}} = 240$ Дж/(л Амага) (\bullet) и
 $Q_{\text{in}} = 300$ Дж/(л Амага) (\blacklozenge).





б

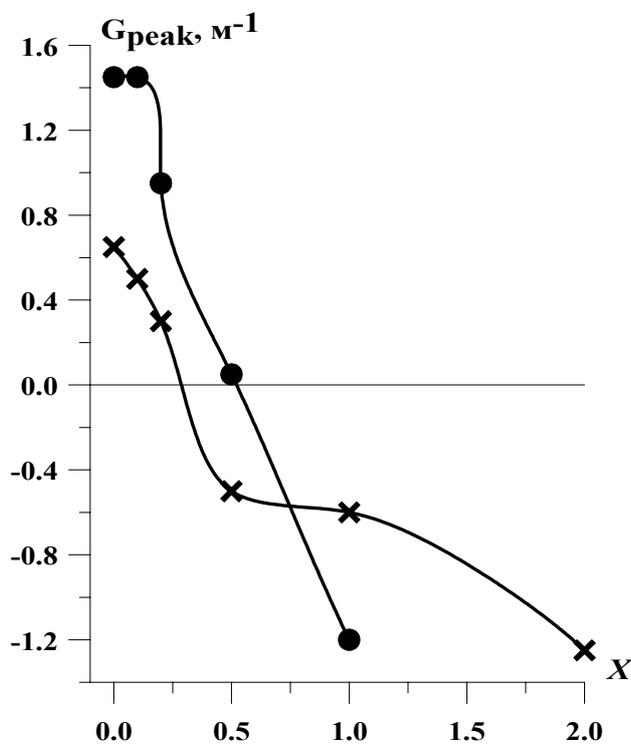


Рис.6. Переход 19→18 P(13)

а) - Временная динамика КУСС для смеси $CO:He:O_2=1:4:X$ при шести значениях X , удельный энерговклад $Q_{in} = 130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость пикового значения КУСС G_{peak} от содержания кислорода X для $Q_{in} = 130$ Дж/(л Амага) (x), $Q_{in} = 240$ Дж/(л Амага) (•).

3.2.2. «Низкорасположенные» переходы

На «низкорасположенных» переходах добавление кислорода в активную среду усилителя $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ приводило только к увеличению значений G_{\max} . На **Рис.7-9** представлена временная динамика КУСС на переходах $14 \rightarrow 13$ P(13) (**Рис.7,а**), $10 \rightarrow 9$ P(15) (**Рис.8,а**) и $7 \rightarrow 6$ P(14) (**Рис.9,а**) в смесях с различным содержанием кислорода X при $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага). На трех рассматриваемых переходах $14 \rightarrow 13$ P(13), $10 \rightarrow 9$ P(15) и $7 \rightarrow 6$ P(14) значение G_{\max} увеличивалось при повышении содержания кислорода X от 0 до 2, причем значения G_{\max} увеличивалось на переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) значительно больше, чем на двух других переходах. Отметим, что погрешность измерения КУСС составляла в среднем $\sim 0.05 \text{ м}^{-1}$, однако точность измерения больших значений КУСС ($|G| > 2$) значительно снижалась. Например, при $X=2$ величина G_{\max} на переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) принимала в различных экспериментах значения от 2.4 м^{-1} до 3.8 м^{-1} . Поэтому далее в работе для величин $G_{\max} \geq 2$ указаны средние значения и 95% доверительные интервалы. Значения временных параметров сокращались на всех трёх переходах для содержания кислорода $X > 0.1$ (**Табл.1**), причем эти значения приближались к значениям для перехода $7 \rightarrow 6$ P(14).

Напомним, что на самом нижнем из зондированных колебательных переходов $5 \rightarrow 4$ излучение не усиливалось, а только поглощалось $G < 0$, но при добавлении в рабочую смесь кислорода длительность импульса поглощения излучения сокращалась. Например, на переходе $5 \rightarrow 4$ P(10) при $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) длительность импульса поглощения, которая измерялась по уровню $G(t) < -1 \text{ м}^{-1}$, уменьшалась от 15 мс в исходной смеси с $X = 0$ до 8 мс в смеси с содержанием кислорода $X = 2$. На следующем колебательном переходе $6 \rightarrow 5$ при $Q_{\text{in}}=100$ Дж/(л Амага) для $J=13$ наблюдался очень короткий импульс усиления длительностью ~ 0.1 мс ($G_{\max} \approx 0.3 \text{ м}^{-1}$) в смеси с содержанием кислорода $X = 4$ (**Рис. 10**), после которого зондирующее излучение только поглощалось (пиковое значение коэффициента поглощения -0.9 м^{-1}) на протяжении более 5 мс. Отметим, что в тех же условиях при зондировании активной среды лазерного усилителя на переходе $6 \rightarrow 5$ P(9) зондирующее излучение не усиливалось, а только поглощалось ($G_{\text{peak}} \approx -2.5 \text{ м}^{-1}$).

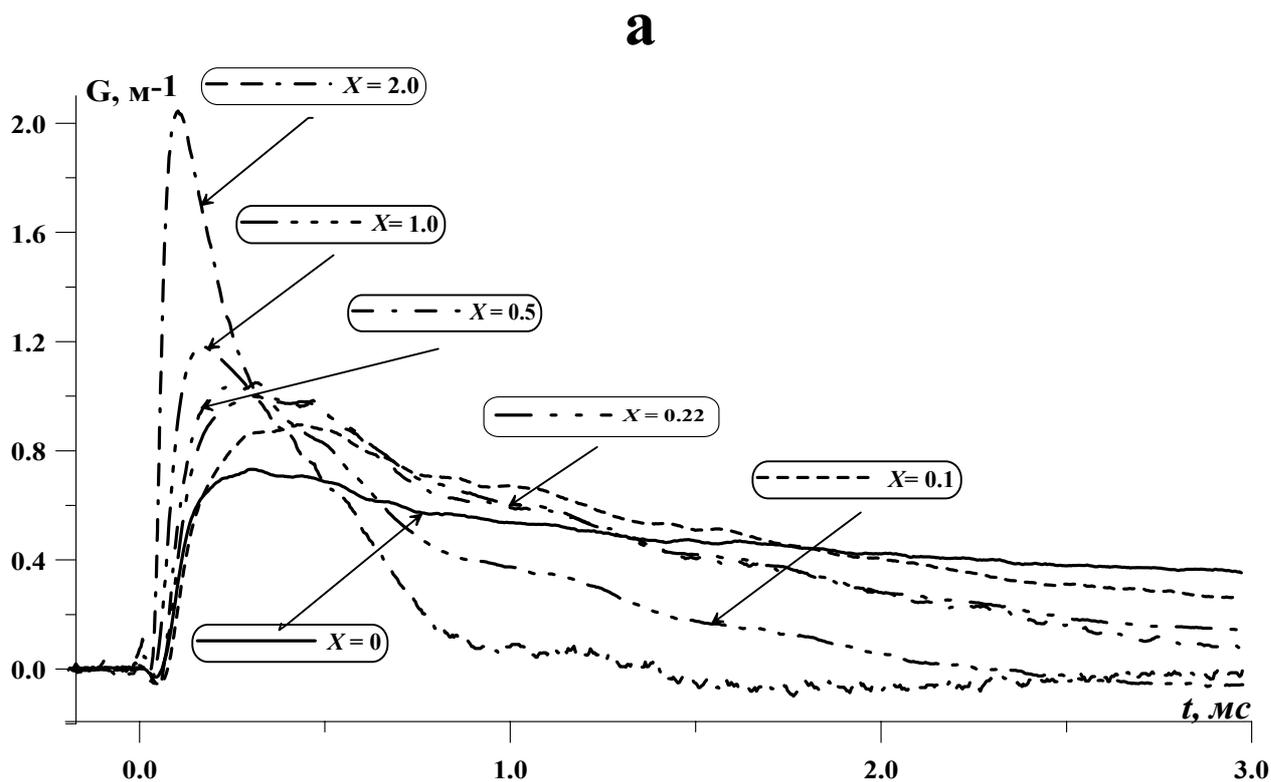


Рис.7. Переход 14→13 Р(13)

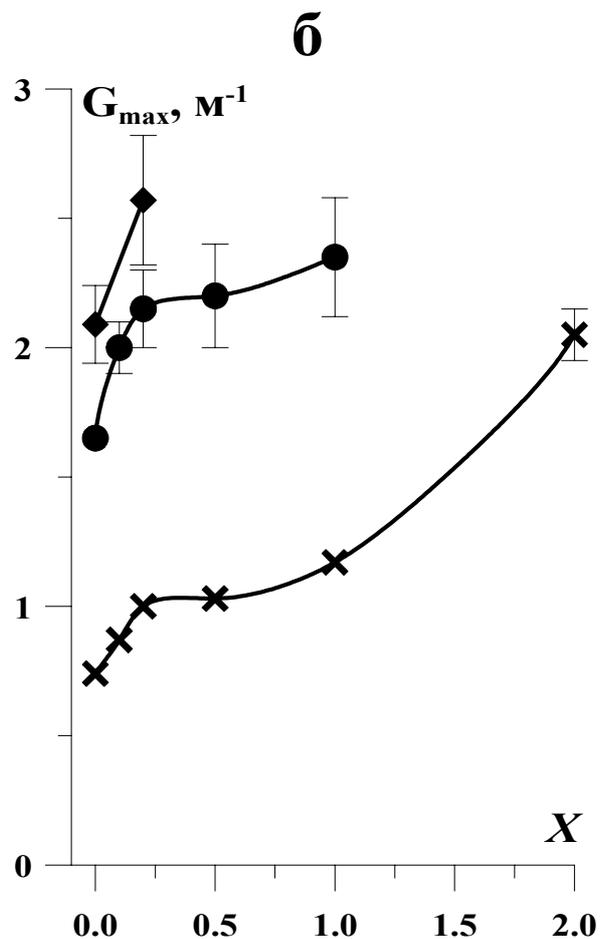
а) - Временная динамика КУСС для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при пяти значениях X , удельный энерговклад $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

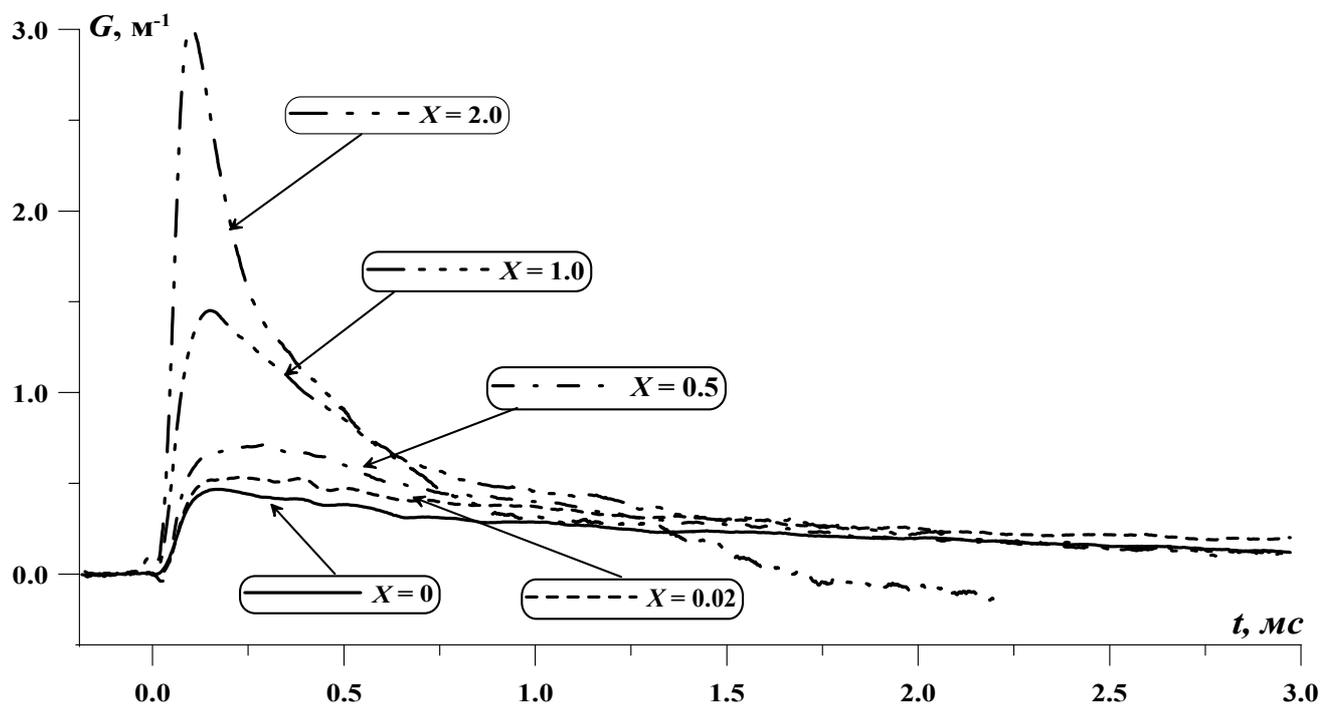
б) - Зависимость максимального значения КУСС G_{max} от содержания кислорода X для

$Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) (\times),

$Q_{\text{in}}=240$ Дж/(л Амага) (\bullet) и

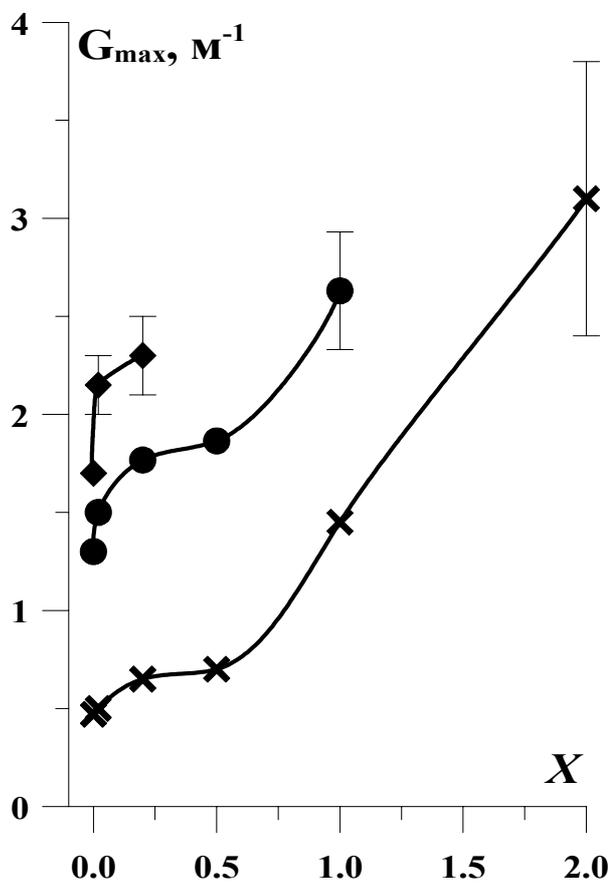
$Q_{\text{in}}=300$ Дж/(л Амага) (\blacklozenge).

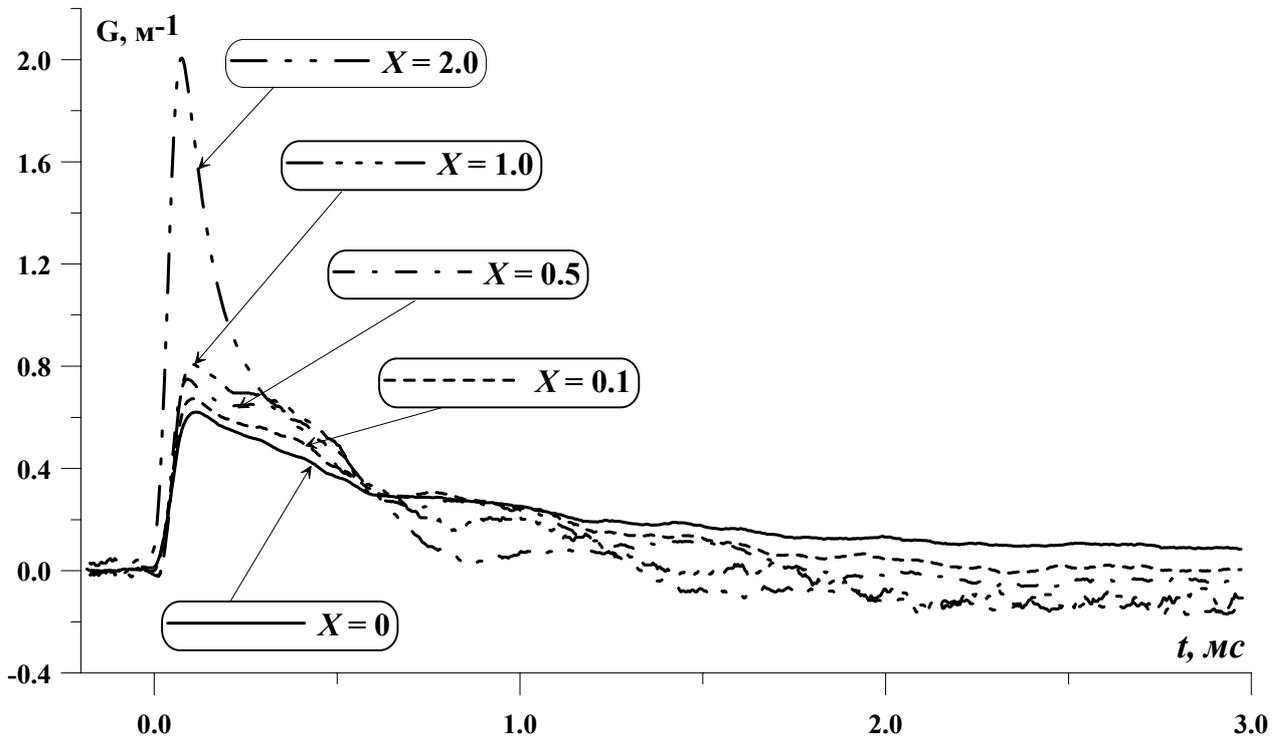


а**б****Рис.8.** Переход 10→9 P(15)

а) - Временная динамика КУСС для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при пяти значениях X , удельный энерговклад $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость максимального значения КУСС G_{max} от содержания кислорода X для $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) (\times), $Q_{\text{in}}=240$ Дж/(л Амага) (\bullet) и $Q_{\text{in}}=300$ Дж/(л Амага) (\blacklozenge).



а**б****Рис.9. Переход 7→6 P(14)**

а) - Временная динамика КУСС для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при пяти значениях X , удельный энерговыдел $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость максимального значения КУСС G_{max} от содержания кислорода X для $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) (\times), $Q_{\text{in}}=240$ Дж/(л Амага) (\bullet).

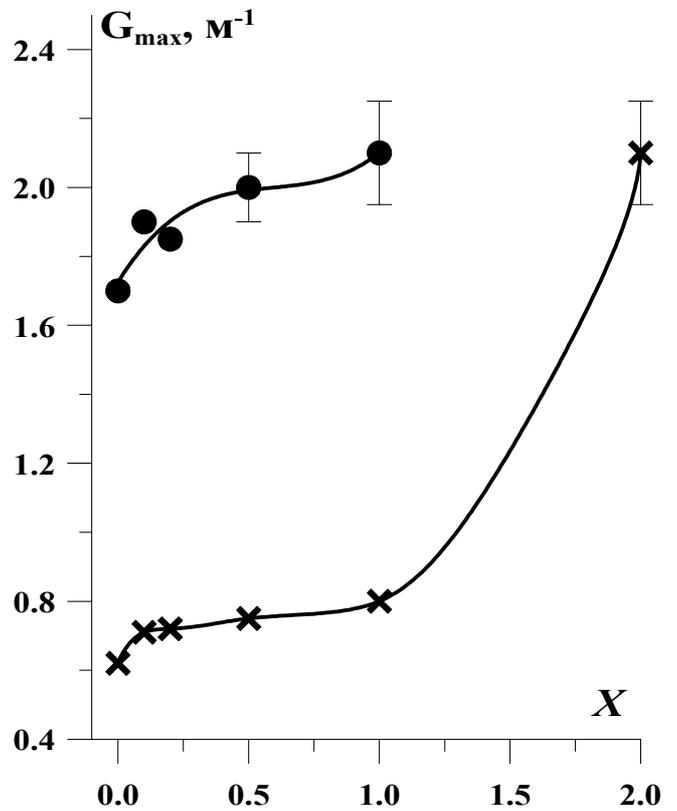


Табл. 1. Значения параметров, характеризующих временную динамику КУСС на «низкорасположенных» переходах 14→13 P(13), 10→9 P(15) и 7→6 P(14) в смеси CO:He:O₂=1:4:X при энерговкладе $Q_{in}=130$ Дж/(л Амага), в зависимости от содержания кислорода X.

X	G_{max}, M^{-1}	$\tau_{09}, \text{мс}$	$\Delta_{\phi}, \text{мс}$	$\Delta_{05}, \text{мс}$	$\Delta_{01}, \text{мс}$
14→13 P(13)					
0	0.65	0.20	0.12	2.5	>9
0.1	0.90	0.26	0.17	1.6	5.2
0.5	1.0	0.17	0.10	1.3	2.7
1	1.2	0.12	0.06	0.62	1.7
2	2.1±0.15	0.08	0.03	0.25	0.67
10→9 P(15)					
0	0.45	0.11	0.07	1.3	7
0.5	0.70	0.13	0.08	1.4	4.0
1	1.5	0.10	0.07	0.52	2.5
2	3.1±0.7	0.08	0.05	0.20	1.0
7→6 P(14)					
0	0.60	0.07	0.04	0.53	3.7
0.1	0.70	0.07	0.04	0.52	1.6
0.5	0.75	0.07	0.04	0.48	1.6
1	0.80	0.07	0.04	0.48	1.2
2	2.0±0.1	0.05	0.03	0.15	0.65

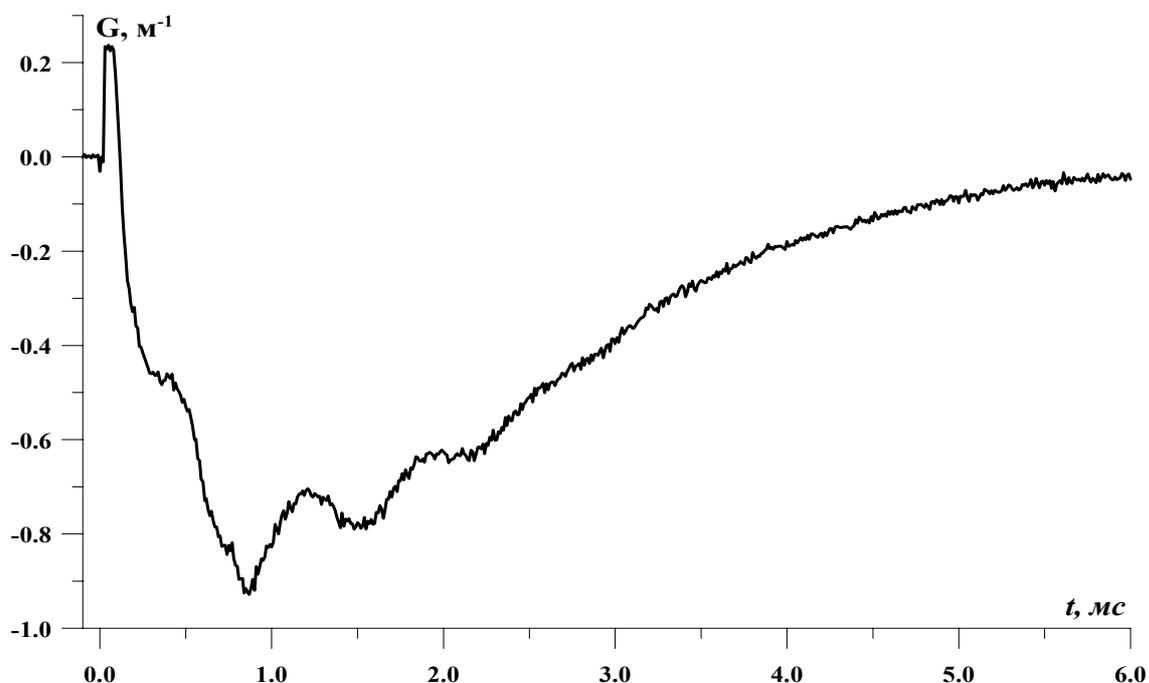


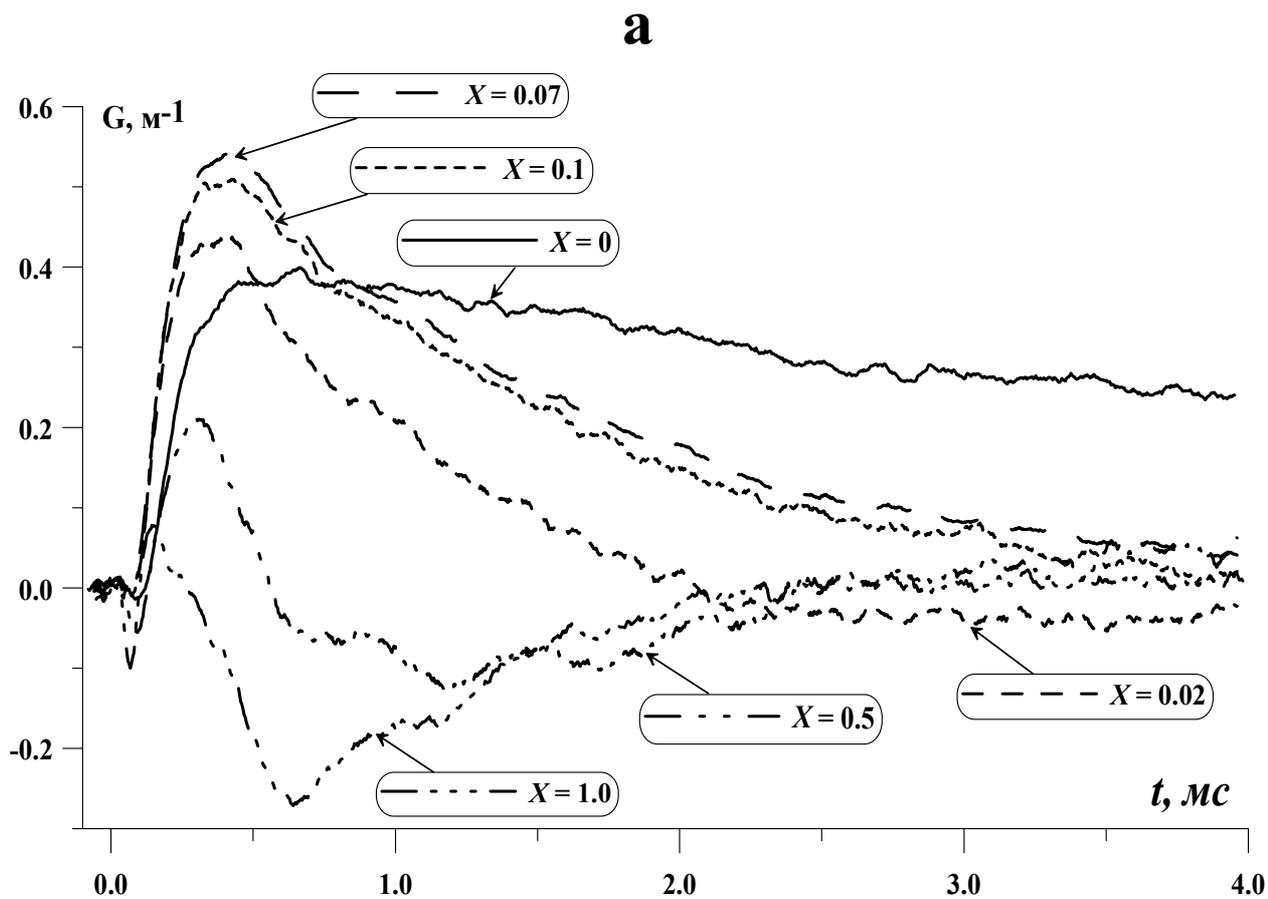
Рис.10. Временная динамика КУСС на переходе 6→5 P(13) для смеси CO:He:O₂=1:4:4, $Q_{in}=100$ Дж/(л Амага)

3.2.3. «Промежуточные» переходы

На переходе 18→17 P(15) (**Рис. 11,а**) при добавлении кислорода (увеличение X от 0 до 0.07) значение $G_{\text{peak}}=G_{\text{max}}$ возрастало от 0.38 м^{-1} до 0.54 м^{-1} при $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж}/(\text{л Амага})$ и от 1.05 м^{-1} до 1.48 м^{-1} при $Q_{\text{in}}=240 \text{ Дж}/(\text{л Амага})$. При дальнейшем увеличении содержания кислорода $X>0.07$ значение G_{peak} монотонно уменьшалось (**Рис.11,б**), причем для смесей с содержанием кислорода $X>0.1$ после завершения импульса усиления величина КУСС принимала отрицательные значения (**Рис. 11,а**). Увеличение содержания кислорода приводило к значительному уменьшению временных параметров Δ_{01} и Δ_{05} , которые сокращались при $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж}/(\text{л Амага})$ от 3.4 мс и 1.2 мс для $X = 0.07$ до 0.5 мс и 0.25 мс для $X = 0.5$, соответственно, а для $X = 1$ значения тех же параметров были еще меньше: $\Delta_{01}=0.13 \text{ мс}$ и $\Delta_{05}=0.03 \text{ мс}$ (**Табл.2**). Отметим, что для $X = 1$ все временные параметры, которые характеризуют временную динамику КУСС на рассматриваемом переходе, мало меняются при изменении энергоклада от $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж}/(\text{л Амага})$ до $Q_{\text{in}}=240 \text{ Дж}/(\text{л Амага})$, хотя значение G_{max} увеличивается при этом почти в пять раз.

Табл. 2. Значения параметров, характеризующих временную динамику КУСС на «промежуточном» переходе 18→17 P(15) в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при $Q_{\text{in}}=130$ (слева) и 240 (справа) Дж/(л Амага), в зависимости от содержания кислорода X .

X	$G_{\text{max}}, \text{ м}^{-1}$		$\tau_{09}, \text{ мс}$		$\Delta_{\phi}, \text{ мс}$		$\Delta_{05}, \text{ мс}$		$\Delta_{01}, \text{ мс}$	
	130	240	130	240	130	240	130	240	130	240
0	0.38	1.05	0.36	0.16	0.22	0.10	>4	1.6	>8	8
0.07	0.54	1.48	0.26	0.16	0.15	0.10	1.2	0.70	3.4	2.5
0.1	0.50	1.4	0.26	0.15	0.15	0.09	1.2	0.70	3.4	2.0
0.2	0.44	1.2	0.26	0.12	0.15	0.06	0.72	0.50	1.6	1.2
0.5	0.22	0.86	0.25	0.12	0.12	0.05	0.25	0.32	0.50	0.45
1.0	0.08	0.38	0.13	0.12	0.03	0.03	0.10	0.08	0.15	0.12

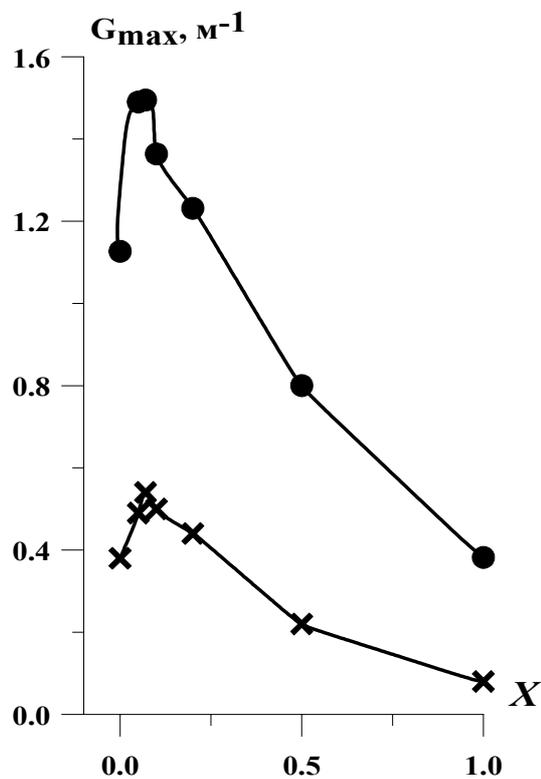


б

Рис.11. Переход 18→17 Р(15)

а) - Временная динамика КУСС для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при шести значениях X , удельный энерговклад $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость максимального значения КУСС G_{max} от содержания кислорода X для $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) (\times), $Q_{\text{in}}=240$ Дж/(л Амага) (\bullet).



3.2. Азотные смеси с добавлением кислорода

До сих пор рассматривались результаты экспериментов по измерению временной динамики КУСС при добавлении молекулярного кислорода в гелиевую рабочую смесь $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$. Аналогичные эксперименты были проведены при добавлении кислорода в азотную рабочую смесь $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2 = 1:9:X$. Измерение временной динамики КУСС в азотной смеси проводилось на двух переходах: на «высокорасположенном» переходе $19 \rightarrow 18 \text{ P}(13)$ и на «низкорасположенном» переходе $10 \rightarrow 9 \text{ P}(15)$. На переходе $19 \rightarrow 18 \text{ P}(13)$ при энерговыкладе $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) добавление кислорода приводило к резкому уменьшению коэффициента усиления (**Рис.12**) так же, как в гелиевой смеси (ср. **Рис.6**). При содержании кислорода $X=1$ излучение зондирующего лазера только поглощалось, а при увеличении X от 1 до 4 длительность импульса поглощения постепенно сокращалась (**Рис.12**).

На «низкорасположенном» переходе $10 \rightarrow 9 \text{ P}(15)$ максимальное значение КУСС при добавлении кислорода возрастало (**Рис.13**). При удельном энерговыкладе $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) значение G_{max} увеличивалось для смеси с содержанием кислорода $X=4$ в два раза по сравнению с исходной смесью $X=0$, а при $Q_{\text{in}}=230$ Дж/(л Амага) - в полтора раза (**Табл.3**). Отметим, что в азотной смеси устойчивость ЭИ разряда была выше, чем в гелиевой смеси, причем как в исходной смеси ($X=0$), так и при добавлении в нее кислорода (до $X=4$). Например, в смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2 = 1:9:X$ с содержанием кислорода $X=4$ разряд был устойчивым при энерговыкладе $Q_{\text{in}}=230$ Дж/(л Амага), хотя в гелиевой смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ с таким же содержанием кислорода $X=4$ ЭИ разряд становился неустойчивым (происходит контракция ЭИ разряда) при энерговыкладе ~ 100 Дж/(л Амага). Значения временных параметров τ_{09} и $\Delta_{\text{ф}}$, характеризующих нарастание КУСС, уменьшались при добавлении кислорода незначительно (**Табл.3**). Более заметно изменялись значения параметров Δ_{05} и Δ_{01} , характеризующих ВСУ. Параметр Δ_{05} при увеличении X от 0 до 4 сократился в 1.6 раза при $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) и в 2 раза при $Q_{\text{in}}=230$ Дж/(л Амага), а параметр Δ_{01} при тех же значениях энерговыклада уменьшался в 1.4 и в 1.7 раза, соответственно.

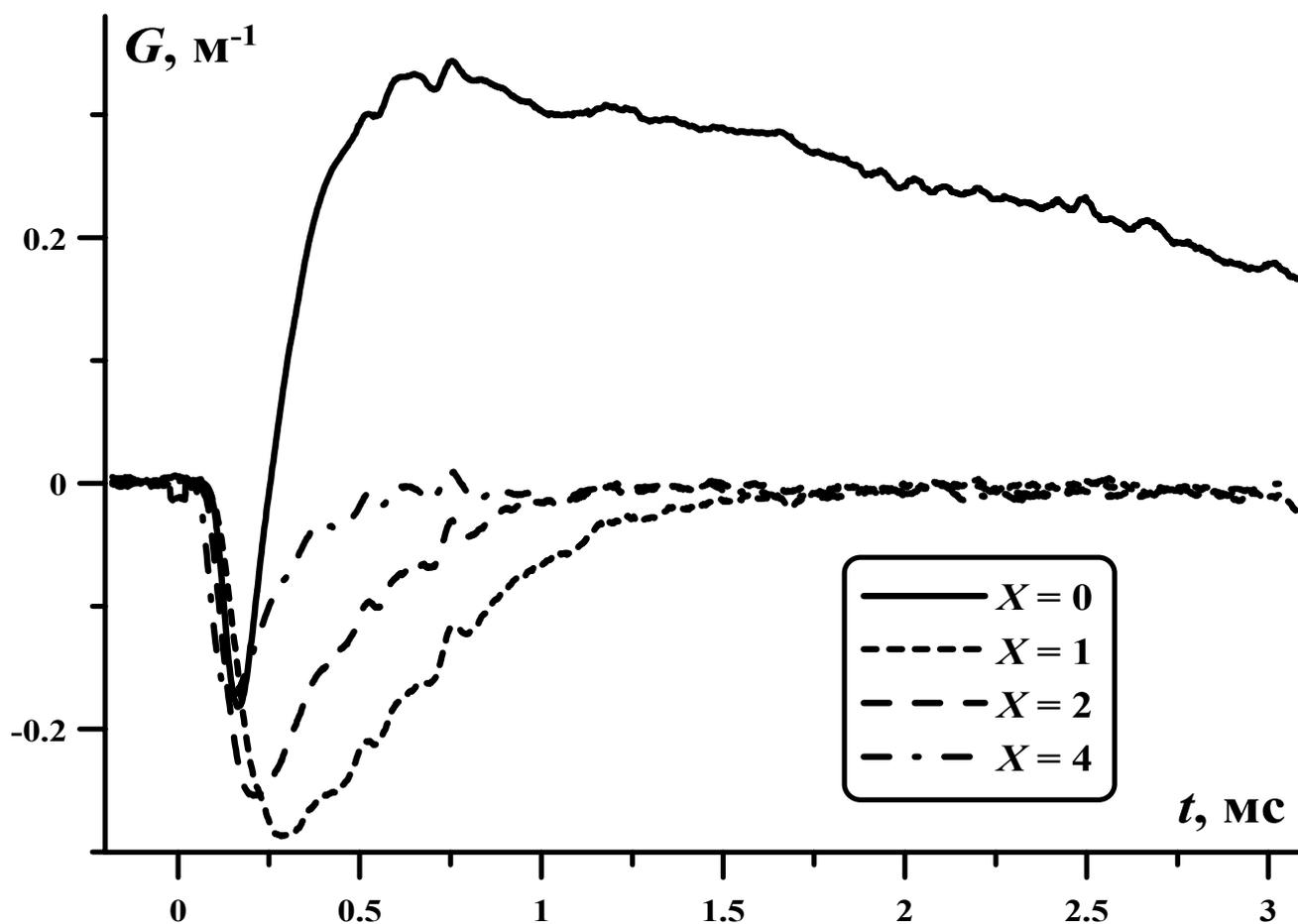


Рис.12. Временная динамика КУСС на колебательно-вращательном переходе $19 \rightarrow 18$ P(13) для смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=1:9:X$ при разном содержании кислорода X . $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

Табл. 3. Значения параметров, характеризующих динамику КУСС $10 \rightarrow 9$ P(15) в смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=1:9:X$ при энерговкладе $Q_{\text{in}}=130$ (слева) и 230 (справа) Дж/(л Амага), в зависимости от содержания кислорода X .

X	$G_{\text{max}}, \text{M}^{-1}$		τ_{09}, ms		Δ_{ϕ}, ms		Δ_{05}, ms		Δ_{01}, ms	
0	0.26	0.68	0.12	0.08	0.06	0.04	1.1	1.25	2.8	3.0
1	0.26	0.69	0.11	0.09	0.06	0.05	0.90	0.90	2.2	2.4
2	0.44	0.85	0.11	0.09	0.06	0.05	0.85	0.64	2.2	2.0
4	0.56	1.12	0.10	0.08	0.06	0.04	0.68	0.63	2.0	1.8

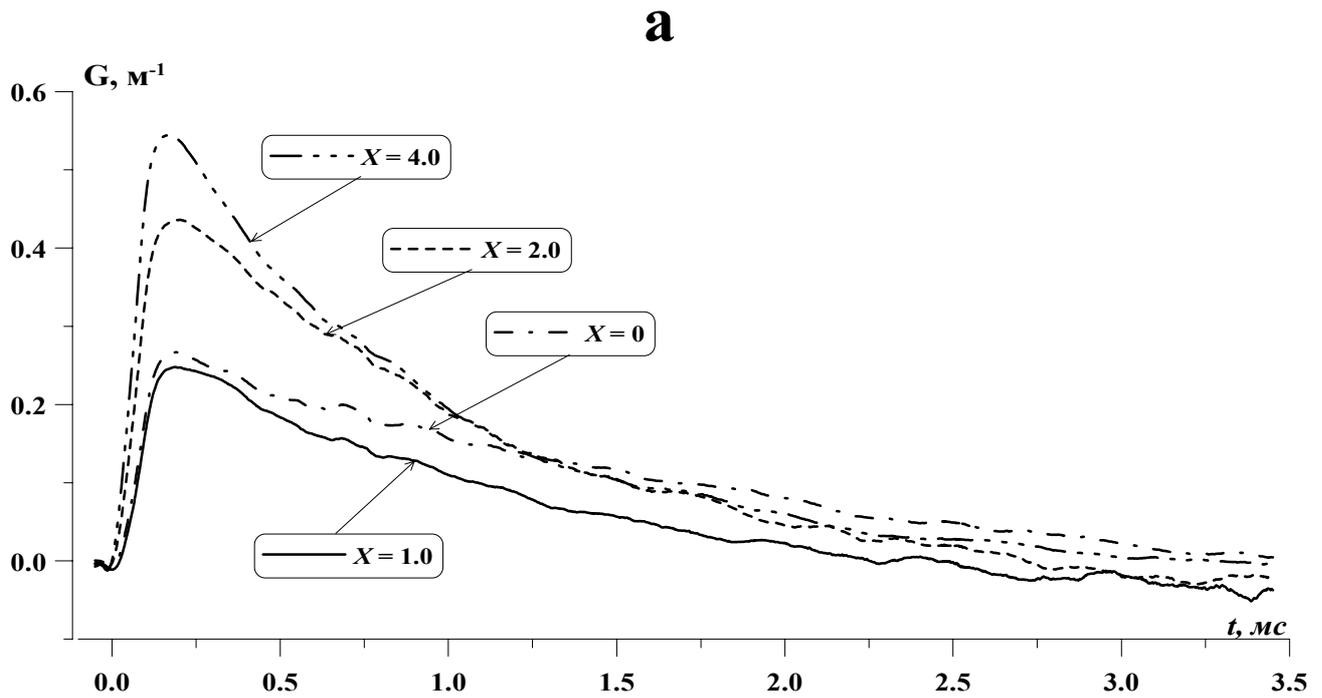


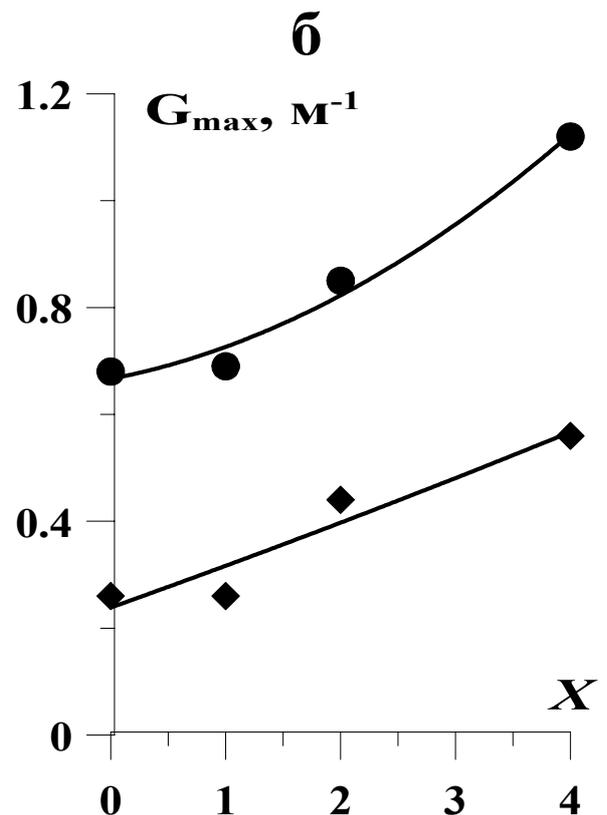
Рис.13. Переход $10 \rightarrow 9$ P(15)

а) - Временная динамика КУСС для азотной смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=1:9:X$ при разных значениях X , удельный энерговклад $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

б) - Зависимость максимального значения КУСС G_{max} от содержания кислорода X для

$Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага) (\blacklozenge),

$Q_{\text{in}}=230$ Дж/(л Амага) (\bullet).



4. Обсуждение экспериментальных данных по измерению КУСС

В настоящем разделе обсуждаются механизмы, которые могут приводить к тому, что на «низкорасположенных» колебательных переходах значения КУСС возрастают при добавлении кислорода в рабочую смесь импульсного лазерного усилителя. Отчасти увеличение значений КУСС связано с тем, что большинство измерений проводилось на таких переходах, на которых частичная инверсная населенность возрастала при нагреве газа. Напомним, что населенность вращательных уровней молекулы СО описывается распределением Больцмана, поэтому при одинаковой колебательной температуре инверсная населенность на колебательно-вращательном переходе существенно зависит от температуры газа [49, 55].

Чтобы оценить насколько нагревалась рабочая смесь лазерного усилителя после импульса накачки, было проведено измерение КУСС в колебательной полосе $10 \rightarrow 9$ на трёх колебательно-вращательных переходах $J = 7, 10$ и 15 для трёх значений $X = 0, 1$ и 2 в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ с начальной температурой $T_0 \approx 130$ К при удельном энергокладе $Q_{\text{in}} = 130$ Дж/(л Амага). Для обработки результатов измерения КУСС применялась процедура восстановления температуры газа и населенности колебательных уровней, описанная в работах [49, 55]. Температура газа T_g и относительная населенность $N_{V=9} / N_{\text{CO}}$ возрастали с увеличением содержания кислорода X (**Рис. 14**). В течение импульса накачки под действием т.н. «быстрого нагрева» рабочая смесь газов нагревалась (на временном интервале от $t=0$ до $t=0.1$ мс) от начального значения $T_0 \approx 130$ К до $T_g \approx 140$ К в исходной смеси $\text{CO}:\text{He} = 1:4$, до $T_g \approx 160$ К в смеси с содержанием кислорода $X = 1$ и до $T_g \approx 185$ К для $X = 2$ (**Рис. 14,а**). Последующий ($t > 0.1$ мс) нагрев газа связан с процессами колебательно-поступательной V/T -релаксации энергии молекул.

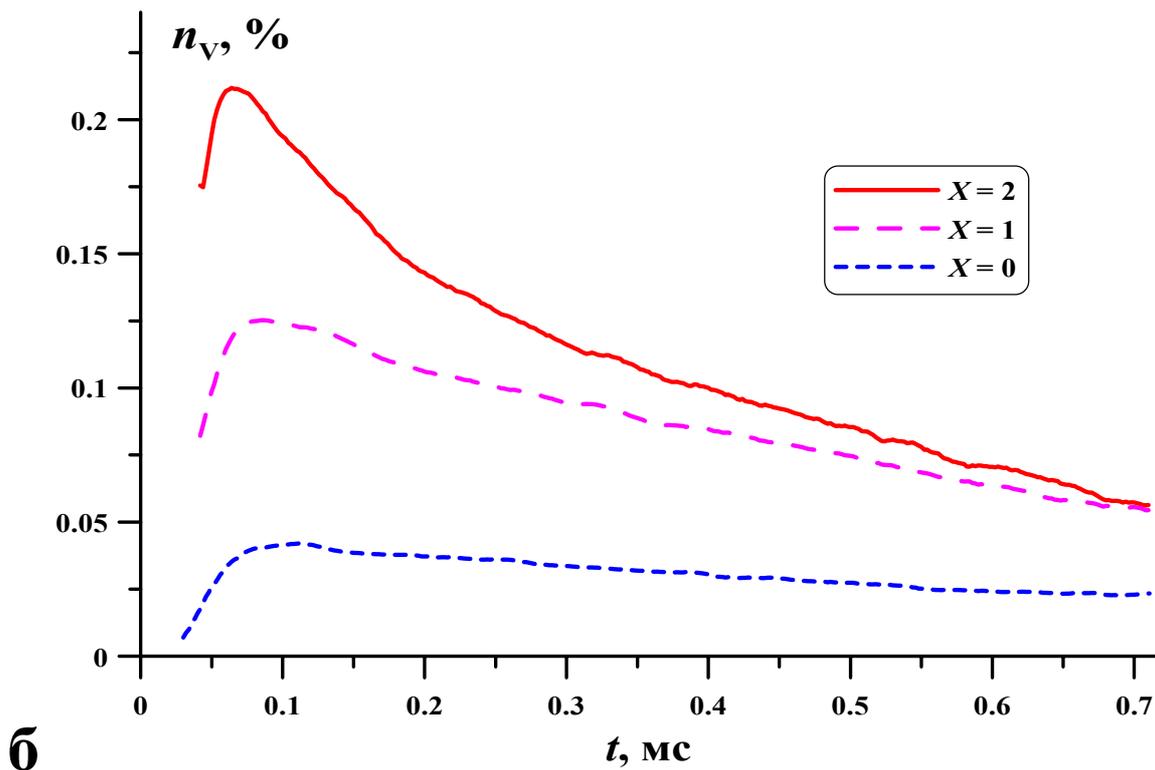
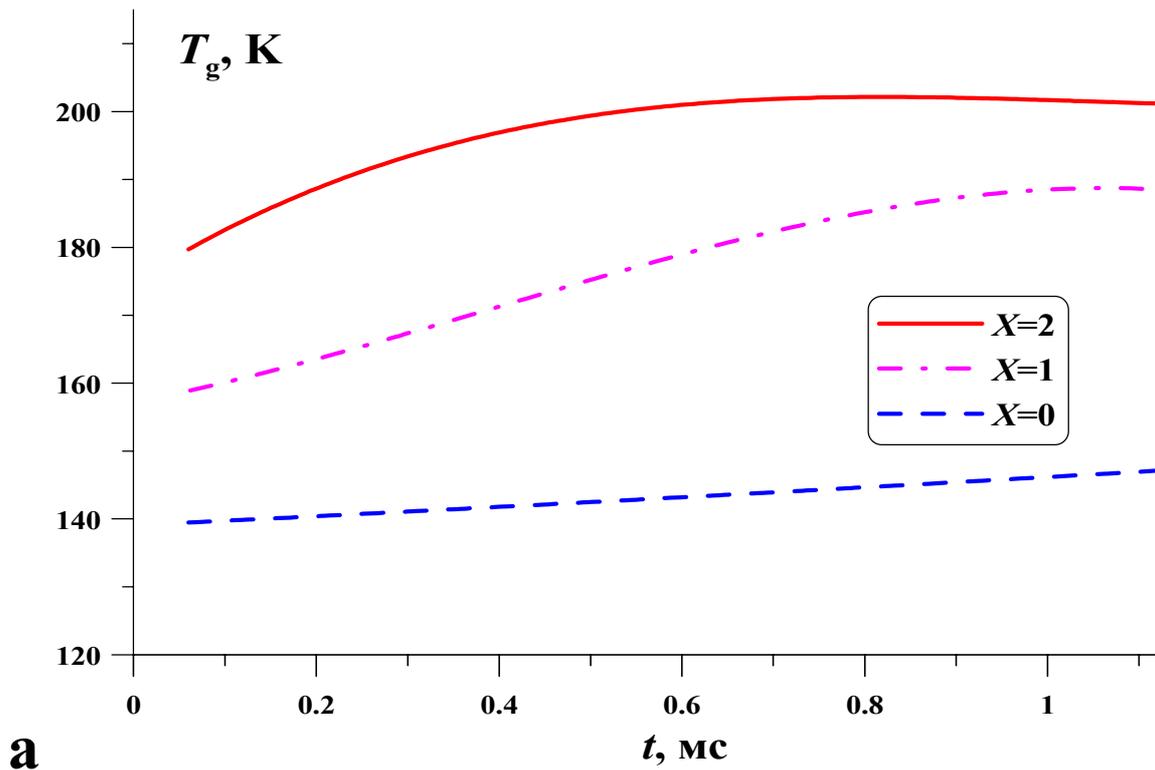


Рис. 14. Временная динамика **а)** температуры газа T_g и **б)** относительной населенности $n_V = N_V / N_{CO}$ колебательного уровня $V=9$ в смеси $CO:He:O_2=1:4:X$ для трех значений $X = 0, 1$ и 2 при удельном энергокладе $Q_{in} = 130$ Дж/(л Амага), $T_0 \approx 130$ К.

В этом эксперименте повышение содержания кислорода X от 0 до 2 приводило к тому, что значение G_{\max} увеличивалось в 1.4, 2.2 и 4 раза для всех трёх переходов $J=7, 10$ и 15 , соответственно. Наши оценки показали, что при фиксированной КФР только из-за нагрева рабочей смеси от $T_g=140$ К до $T_g=200$ К значение КУСС на переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) может увеличиться в 1.9 раза, но значения КУСС для $J=7$ и 10 при тех же условиях должны были уменьшаться. Поэтому увеличение значений G_{\max} на «низкорасположенных» колебательных переходах при добавлении кислорода в рабочую смесь слабо связано с нагревом газа. Действительно, при добавлении кислорода возрастает скорость колебательной релаксации, что увеличивает поступательную температуру газа, но при этом уменьшается колебательная температура и, соответственно, снижается инверсная населенность на колебательно-вращательном переходе. Основная причина увеличения значений G_{\max} на «низкорасположенных» колебательных переходах связана, по-видимому, с увеличением населенности соответствующих колебательных уровней в кислородных смесях. Например, для колебательного уровня $V=9$ пиковое значение относительной населенности $n_V=N_V/N_{CO}$ возрастало почти в пять раз при увеличении X от 0 до 2 (**Рис. 14,б**).

Населенность колебательных уровней N_V существенно зависит от накачки. В обсуждаемых экспериментах накачка активной среды лазерного усилителя контролировалась с помощью параметра Q_{in} , который характеризует среднее значение удельного энерговклада. Однако пространственное распределение энерговклада является неоднородным по сечению разрядной области, что связано с неоднородностью ионизирующего электронного пучка и напряженности электрического поля, а также с изменением температуры и плотности газа по высоте охлаждаемой разрядной камеры [55]. В частности пространственная неоднородность распределения энерговклада проявлялась в том, что локальное значение удельного энерговклада Q_{loc} на оси разрядной камеры составляло $Q_{loc} \sim 0.7 Q_{in}$ [54]. При изменении состава рабочей смеси газов могут меняться свойства газового разряда, в частности может измениться пространственное распределение энерговклада. Чтобы оценить насколько

изменялось распределение энерговклада при добавлении кислорода, было проведено сравнение временной динамики КУСС на переходе 10→9 P(15), измеренной при одинаковой высоте расположения зондирующего лазерного пучка, но на разном расстоянии w от оси камеры. На **Рис.15** представлена временная динамика КУСС, измеренная вдоль оси разрядной камеры в центре межэлектродного промежутка $w=0$ (**Рис.15,а**) и на расстоянии $w=6$ см (**Рис.15,б**), т.е. вблизи края разрядной области. При добавлении кислорода в рабочую смесь лазерного усилителя для X от 0 до 2 значение G_{\max} увеличилось примерно в 4 раза при удельном энерговкладе $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага), как в центре, так и вблизи края разрядной области. Отметим, что измерение КУСС проводилось при повышенной начальной температуре газа $T_0 \approx 130$ К, и значения G_{\max} были при этом в полтора-два раза меньше, чем при $T_0 \approx 120$ К. Соотношение значений $G_{\max}(w=0) / G_{\max}(w=6 \text{ см}) \approx 2.0$ не менялось при увеличении содержания кислорода X от 0 до 2, что позволяет сделать вывод о том, что пространственное распределение удельного энерговклада мало менялось при добавлении кислорода.

Интересно сопоставить временные параметры динамики КУСС на краю разряда и в центре (на оси) разрядной камеры (**Рис.15**). В исходной смеси $X=0$ временные параметры τ_{09} и $\Delta_{\text{ф}}$, характеризующие нарастание КУСС, были примерно в два раза больше вблизи края разрядной области, чем на оси камеры. Такое соотношение временных параметров указывает на то, что локальное значение удельного энерговклада вблизи края разряда было меньше (медленное нарастание КУСС), чем на оси камеры. С другой стороны, в исходной смеси параметры Δ_{05} и Δ_{01} , характеризующие ВСУ, были, наоборот, в 1.4 раза меньше (быстрая релаксация) вблизи края, чем на оси. Сокращение ВСУ связано, по-видимому, с тем, что вблизи края разрядной области находится большое количество невозбужденного газа. При добавлении кислорода для X от 0 до 2 значения временных параметров уменьшились в полтора-два раза.

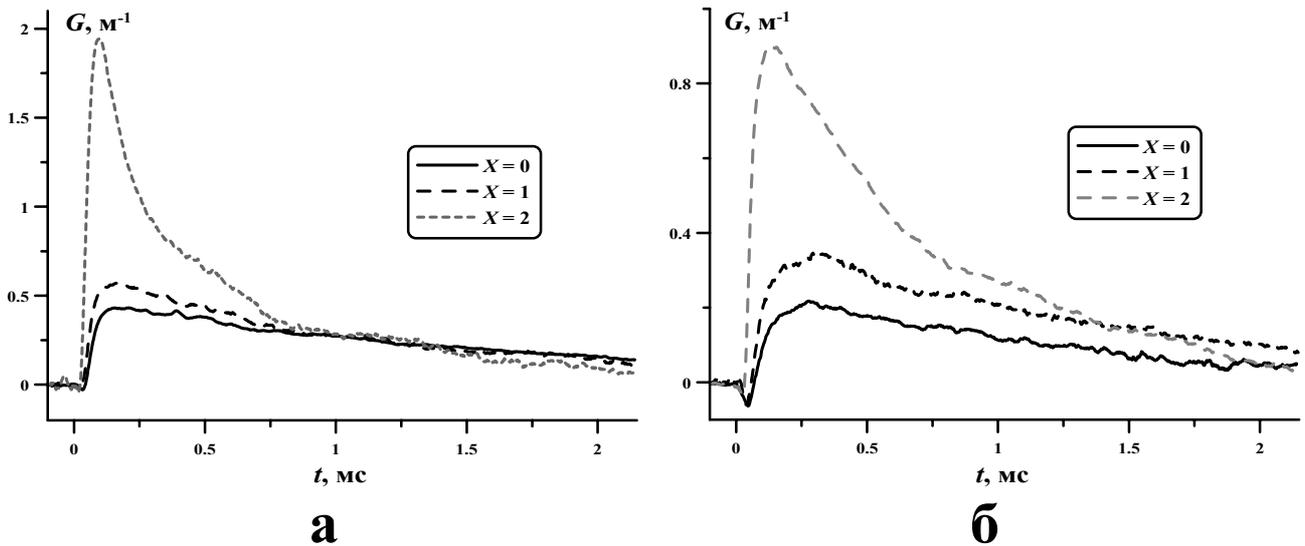


Рис.15. Временная динамика КУСС на переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) при различном содержании кислорода X в рабочей смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$.

а) - в центре (на оси) разрядной камеры; **б)** - на краю разрядной области.

$$Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж/л Амага), } T_0 \approx 130 \text{ К.}$$

Рассмотрим теперь кинетические процессы обмена колебательной энергией между молекулами, поскольку ими определяется временная динамика КУСС в активной среде импульсного СО-лазера. В процессе импульсной накачки заселяются самые нижние колебательные уровни молекулы СО. Заселение более высоких уровней происходит в процессах т.н. внутримолекулярного VV -обмена между молекулами СО:



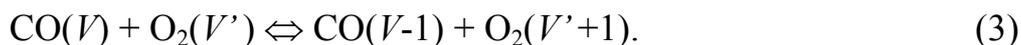
В наших экспериментах излучение зондирующего лазера на колебательных переходах $5 \rightarrow 4$ и $6 \rightarrow 5$ только поглощалось в среде лазерного усилителя, а на переходе $7 \rightarrow 6$ имелось значительное усиление. Это указывает на то, что пологое плато КФР начинается на колебательном уровне $V_T \approx 5$, который соответствует минимуму триноровской функции распределения [6-9]. Отсюда можно оценить значение эффективной колебательной температуры, определяемой соотношением (см., например, [9]) $\Theta(V) = E_V [k \ln(N_{V-1}/N_V)]^{-1}$, где E_V и N_V – энергия колебательного перехода и населенность уровня V , k – постоянная Больцмана. Колебательная температура первого колебательного уровня молекул СО связана с номером V_T соотношением [9] $\Theta_{\text{CO}}(V=1) = T_g E_{v=1} / [\Delta E (2 V_T - 1)]$, где ΔE – постоянная ангармонизма молекулы

CO, поэтому для $V_T \approx 5$ и при поступательной температуре газа $T_g \approx 140$ К значение колебательной температуры равно $\Theta_{CO}(V=1) \approx 2.5 \cdot 10^3$ К ≈ 0.22 эВ.

Присутствие в рабочей газовой смеси других молекул (N_2 , O_2 и др.) оказывает значительное влияние на временные параметры КУСС, поскольку в среде происходят процессы межмолекулярного VV' -обмена колебательной энергией. На **Рис.16** представлена диаграмма энергии колебательных переходов E_V для трех молекул O_2 , CO и N_2 . Отметим, что молекула азота обладает самой высокой энергией колебательного перехода $0 \rightarrow 1$ (~ 2330 см⁻¹). В рабочей смеси CO-лазера азот играет роль резервуара колебательной энергии. В процессе накачки происходит заселение колебательно возбужденных состояний молекулы азота, а затем колебательная энергия передается молекулам CO путем межмолекулярного VV' -обмена:



Подобный VV' -обмен происходит между молекулами CO и O_2 (см., например, [57]):



Энергия колебательного перехода $0 \rightarrow 1$ для молекулы кислорода (~ 1560 см⁻¹) значительно меньше, чем для окиси углерода (~ 2140 см⁻¹), но для молекул CO, находящихся в высоко возбужденных колебательных состояниях при $V \approx 20$, VV' -обмен (3) носит резонансный характер (**Рис.16**). В процессах межмолекулярного VV' -обмена (3) система, состоящая из колебательно возбужденных молекул CO и O_2 , стремится к динамическому равновесию, при котором достигается равная вероятность прямого и обратного VV' -обмена. Для бинарной смеси ангармонических осцилляторов такое равновесие достигается при равенстве значений эффективных колебательных температур [9]. Для смеси колебательно возбужденных молекул CO и O_2 условие динамического равновесия VV' -обмена (3) имеет вид $\Theta_{CO}(V \approx 20) = \Theta_{O_2}(V'=1)$. В условиях проведенных экспериментов для исходной рабочей смеси ($X=0$) квазиравновесная КФР f_v для колебательных уровней $V \sim 20$ имеет вид плато, причем КФР можно представить в виде $f_v \sim (v+1)^{-1}$ [9], при этом $\ln(N_{v-1}/N_v) = \ln(1+v^{-1}) \approx 1/v$. Учитывая значение $E_{V \approx 25} / k \approx 2.3 \cdot 10^3$ К, можно оценить величину эффективной колебательной температуры $\Theta_{CO}(V \approx 20) \approx V \times 2.3 \cdot 10^3$ К $\approx 5 \cdot 10^4$ К ≈ 4 эВ, причем относительная населенность

этих уровней составляет $N_{V \approx 20} / N_{CO} \sim 10^{-4}$ [9, 49, 55], где N_{CO} – концентрация молекул CO. Добавление в такую среду молекул кислорода при $X < 10^{-4}$ почти не изменяет вид КФР для молекул CO, но сами молекулы O_2 переходят при этом в высоко возбужденные состояния. Увеличение содержания кислорода приводит к тому, что колебательная температура молекул CO $\Theta_{CO}(V \approx 20)$ уменьшается, а при $X \gg 10^{-4}$ на уровнях $V \approx 20$ КФР для молекул CO почти повторяет быстро спадающую функцию распределения молекул O_2 на нижних колебательных уровнях $V' \sim 1$. Таким образом, при добавлении кислорода $X > 0.01$ существенно изменяется вид КФР: на уровнях близких к $V \approx 20$ вместо плато образуется резкий спад КФР. В азотсодержащей рабочей смеси КФР изменяется при добавлении кислорода как для молекул CO, так и для молекул N_2 , поэтому влияние содержания кислорода X на временную динамику КУСС проявляется в меньшей степени для азотной смеси, чем для гелиевой смеси.

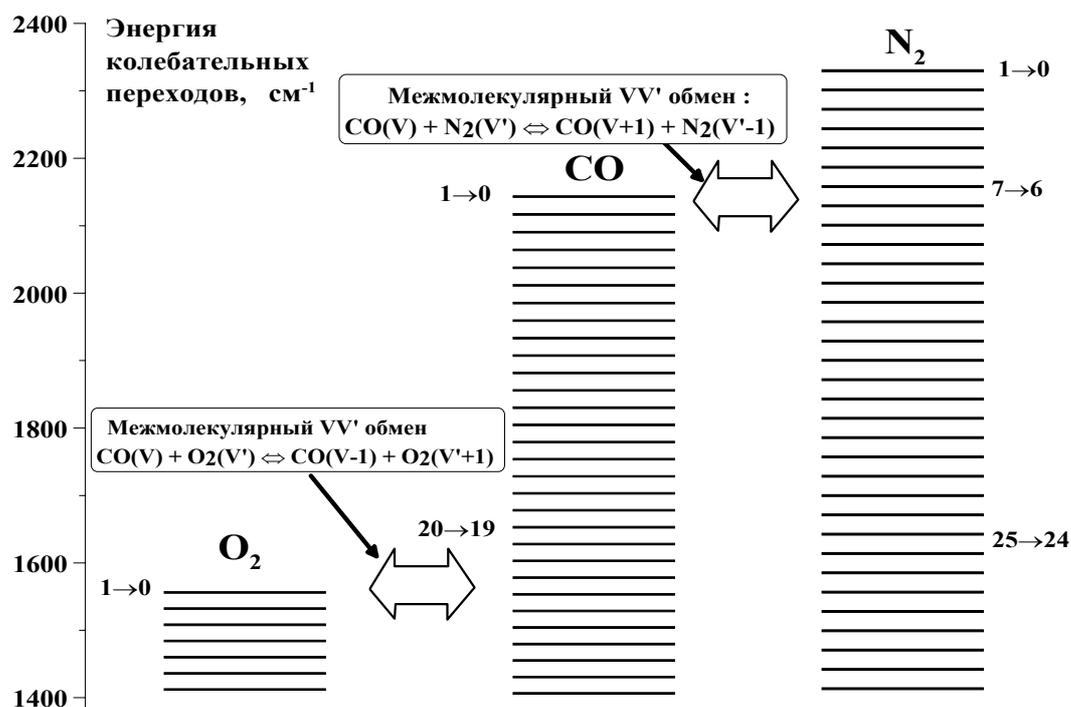


Рис.16. Энергия колебательных переходов молекул O_2 , CO, N_2 .

Время существования инверсной населенности (или иначе ВСУ) на всех исследованных переходах сокращалось при увеличении содержания кислорода в рабочей смеси. На **Рис. 17** представлено изменение временного параметра Δ_{05} , характеризующего ВСУ по уровню $0.5 G_{max}$, в зависимости от колебательного квантового числа V в смеси $CO:He:O_2=1:4:X$. При добавлении кислорода в

исходную смесь значения параметра Δ_{05} уменьшались на всех переходах, причем более резкое сокращение ВСУ происходило на высоких колебательных переходах. Временные параметры КУСС уменьшаются на всех колебательных переходах из-за того, что при VV' -обмене (3) колебательная энергия, запасенная молекулами CO, расходуется на возбуждение молекул O_2 , которые имеют более высокую скорость колебательно-поступательной VT -релаксации $\sim 10^{-13}$ см³/с [46, 58], чем молекулы CO ($\sim 10^{-16}$ см³/с [58]). Высокая скорость VT -релаксации молекул O_2 проявляется в том, что кислородсодержащая рабочая смесь лазерного усилителя нагревается после импульсной накачки до более высокой температуры, чем исходная смесь [49, 55]. При увеличении содержания кислорода в рабочей смеси возрастает скорость релаксации колебательной энергии молекул CO, и чем ближе номер колебательного перехода V к резонансу VV' -обмена (3) при $V \approx 20$, тем чувствительнее к содержанию кислорода становятся временные параметры КУСС.

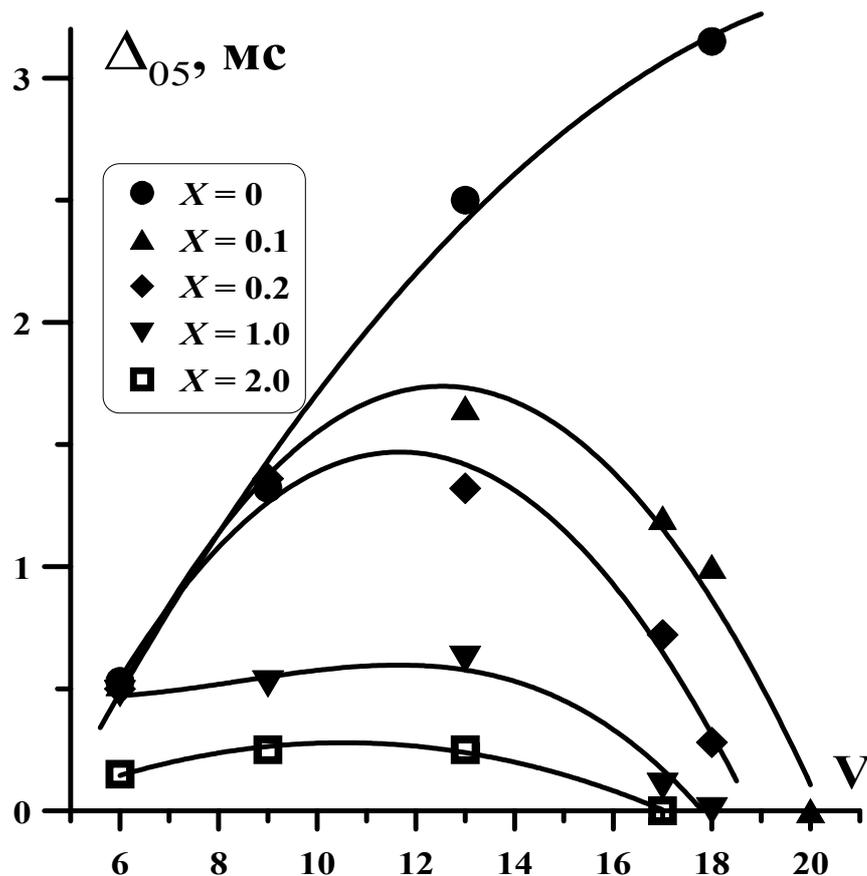


Рис.17. Зависимость значений временного параметра Δ_{05} от колебательного квантового числа V для смеси CO:He: O_2 =1:4: X при пяти значениях X . Удельный энерговклад $Q_{in}=130$ Дж/(л Амага).

При добавлении кислорода в рабочую смесь лазерного усилителя пиковое значение КУСС G_{peak} на «высокорасположенных» колебательных переходах уменьшалось, и чем выше располагался переход, тем меньше требовалось кислорода, чтобы усиление излучения сменилось поглощением $G_{\text{peak}} < 0$ (Рис. 18). Такое уменьшение значений G_{peak} при добавлении кислорода обусловлено спадом КФР для молекул СО под действием межмолекулярного VV' -обмена (3). На «низкорасположенных» колебательных переходах зависимость значения G_{peak} от содержания кислорода X иная: пиковое значение КУСС G_{peak} только возрастало, причем многократно, при увеличении X от 0 до 2 (Рис. 18).

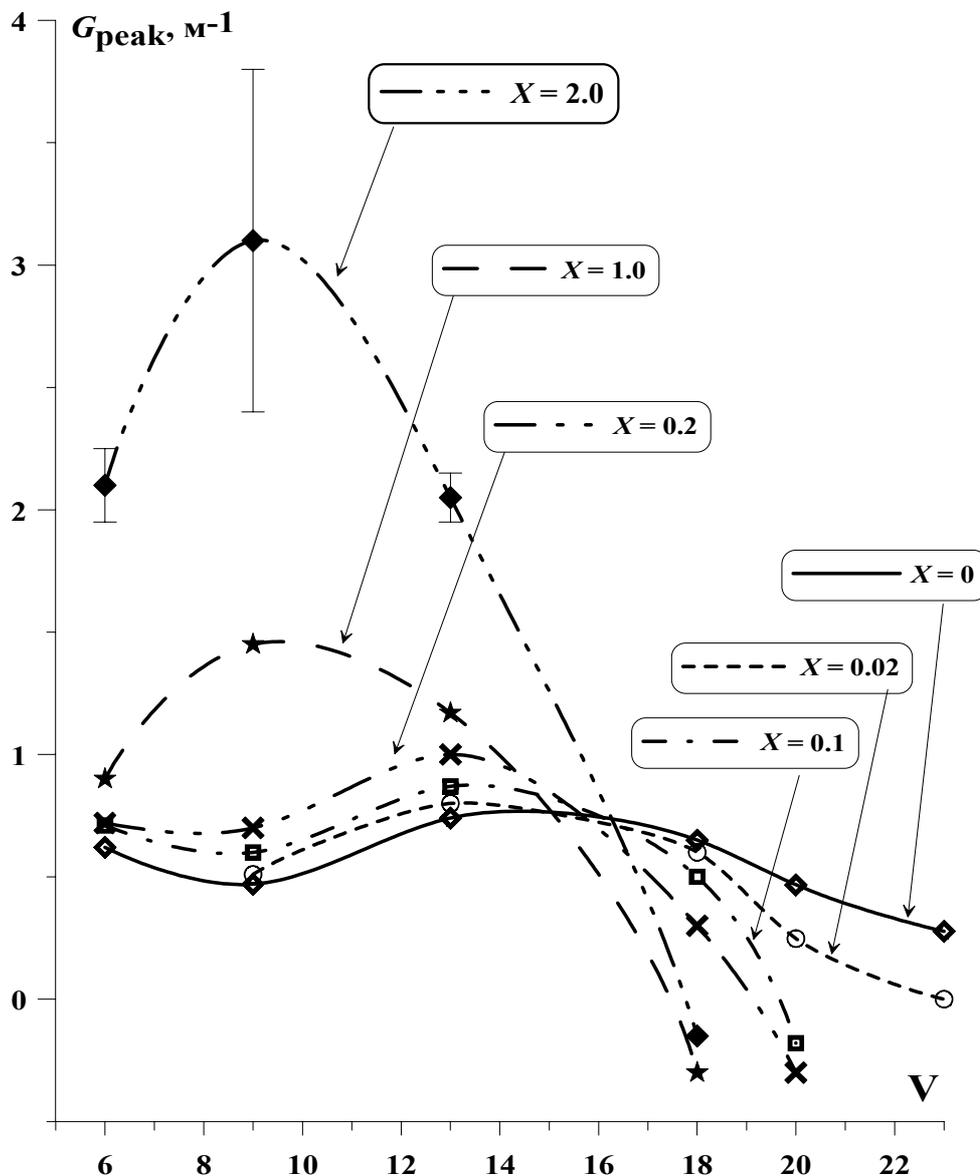


Рис.18. Зависимость пикового значения КУСС G_{peak} от числа V для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при шести значениях X . Для $G_{\text{peak}} \geq 2$ указаны 95% доверительные интервалы. Удельный энерговклад $Q_{\text{in}}=130$ Дж/(л Амага).

Проведенные эксперименты продемонстрировали, что добавление кислорода в рабочую смесь лазерного усилителя увеличивают скорость релаксации колебательной энергии запасенной молекулами СО, но, кроме того, процессы VV' -обмена (3) могут приводить к накоплению частиц на «низкорасположенных» колебательных уровнях молекулы СО. Действительно, колебательная энергия посредством VV -обмена (1) передается от самых нижних колебательных уровней молекулы СО, на которых запасена основная часть энергии, до уровней $V \approx 20$, на которых энергию забирают молекулы кислорода. Вместе с тем, поток колебательной энергии Φ_V при VV -обмене (1) существенно зависит от населенности промежуточных уровней, причем в области плато КФР $\Phi_V \sim N_V^2$ [9]. Механизм увеличения населенности на «низкорасположенных» колебательных уровнях можно связать, как предлагалось в [20, 49], непосредственно с процессами VV' -обмена (3), поскольку при передаче колебательной энергии от СО к O_2 молекула СО спускается вниз по колебательным уровням $V \rightarrow V-1$. В этом смысле, процессы (3) выступают в роли преграды для заселения «высокорасположенных» колебательных уровней СО, при этом происходит накопление молекул СО на «низкорасположенных» колебательных уровнях. Аналогичный эффект наблюдался при добавлении азота в активную среду СО-лазера, действующего на высоких колебательно-вращательных переходах в полосе первого колебательного обертона молекулы СО [53]. Несимметричный VV' -обмен между молекулами окиси углерода и азота $CO(V+2)+N_2(V') \Leftrightarrow CO(V)+N_2(V'+1)$, где $V \approx 40$ и $V' \approx 1$, приводил к снижению коэффициента усиления излучения на переходах близких к резонансному $V > 34$ и, наоборот, к увеличению КУСС на ниже расположенных переходах V от 24 до 34.

Таким образом, анализ результатов проведенных экспериментов позволяет объяснить изменение временной динамики КУСС при больших добавках кислорода в рабочую смесь импульсного лазерного усилителя на основе только кинетических процессов внутримолекулярного VV -обмена молекул СО и межмолекулярного VV' -обмена между молекулами СО и O_2 , без привлечения плазмохимических процессов.

5. Импульсный ЭИ СО-лазер на кислородсодержащих газовых смесях

Результаты исследования временной динамики КУСС, представленные в предыдущем разделе, продемонстрировали, что в активной среде СО-лазера при добавлении кислорода возрастают значения G_{\max} и населенность N_V на нижних колебательных уровнях. Рассмотрим теперь, как меняются энергетические и временные характеристики излучения импульсного ЭИ СО-лазера при добавлении кислорода в лазерную смесь $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$. Выходные окна ЭИ разрядной камеры, изготовленные из CaF_2 , устанавливались под углом Брюстера к оси лазерного резонатора, причем ось была позиционирована в центре межэлектродного промежутка. Лазерный резонатор длиной 3 м был образован глухим сферическим зеркалом с радиусом кривизны 10 м и плоским выходным зеркалом с коэффициентом отражения 50% в диапазоне длин волн λ от 5 до 6 мкм. Апертура выходного излучения была ограничена диафрагмой диаметром 30 мм, установленной внутри лазерного резонатора вблизи выходного зеркала.

При добавлении кислорода сокращались временные параметры импульса лазерного излучения. На **Рис.19** представлена временная динамика мощности излучения лазера, нормированная на максимальное значение лазерной мощности. При увеличении содержания кислорода X длительность импульса излучения, измеренная на половине высоты, сокращалась в шесть раз от 120 мкс для исходной смеси до 20 мкс для $X=4$. При этом временная задержка между началом импульса накачки и началом импульса лазерного излучения уменьшалась от 30 мкс до 20 мкс, соответственно.

На **Рис.20** представлены значения удельного лазерного энергосъема Q_{out} в зависимости от величины удельного энерговклада Q_{in} при различном содержании кислорода X . Отметим, что при увеличении X сокращалось значение порогового энерговклада Q_t (Табл.4), при превышении которого начиналась генерация излучения $Q_{\text{out}} > 0$, т.е. потери излучения в лазерном резонаторе полностью компенсировались усилением излучения в активной среде при энерговкладе Q_t . Уменьшение порогового энерговклада означает, что при добавлении кислорода наибольшее среди всех колебательно-вращательных переходов значение КУСС сравнивается с коэффициентом потерь излучения в лазерном резонаторе при меньшем значении энерговклада Q_{in} . Эффективность преобразования энергии, вложенной при импульсной накачке в активную среду

лазера, в энергию импульса лазерного излучения (далее КПД, значение которого равно $\text{КПД} = Q_{\text{out}}/Q_{\text{in}} * 100\%$) увеличивалась при добавлении кислорода (**Рис.21**). С увеличением содержания кислорода X КПД лазера возрастал и достигал максимального значения при меньшей величине удельного энерговклада Q_M (**Табл. 4**). Например, в исходной смеси максимальный КПД=17% достигался при $Q_M=290$ Дж/(л Амага), а в смеси с содержанием кислорода $X=4$ максимальный КПД=27% - при $Q_M=115$ Дж/(л Амага).

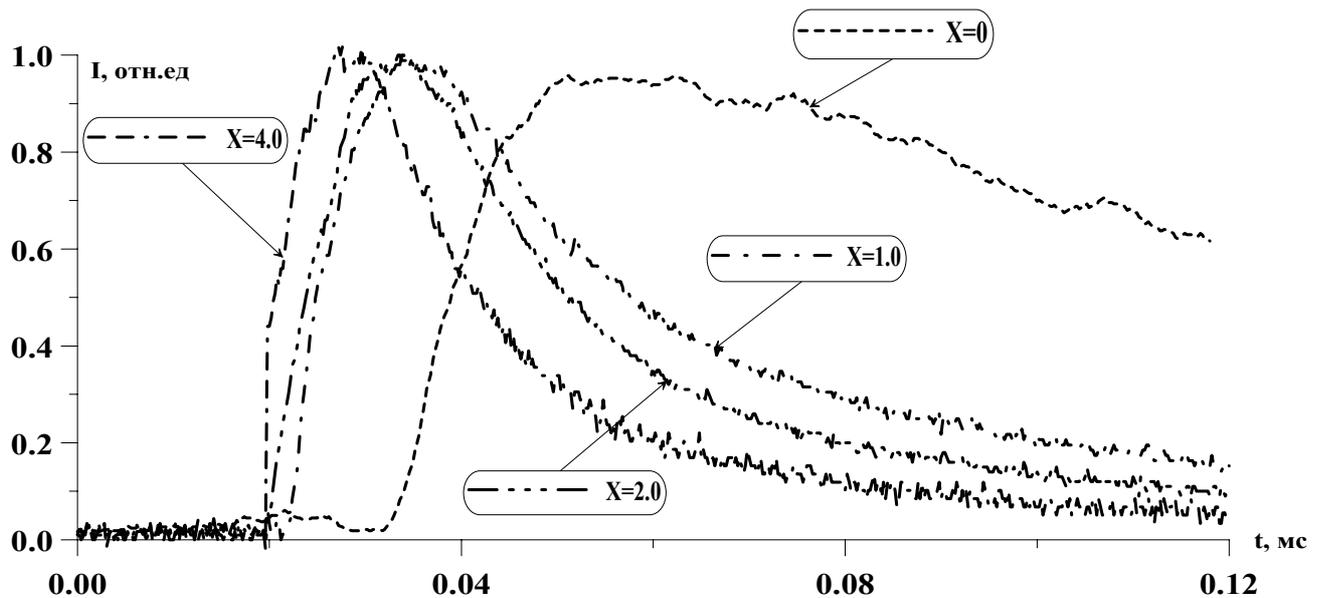


Рис.19. Мощность лазерного излучения, нормированная на максимальное значение, для рабочей смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ при содержании кислорода $X=0, 1, 2$ и 4 . $Q_{\text{in}} = 130$ Дж/(л Амага).

Табл. 4. Значения параметров, характеризующих генерацию лазерного излучения в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$ в зависимости от содержания кислорода X . N_g – плотность газовой смеси. Q_t - пороговый энерговклад, Q_M – удельный энерговклад, при котором достигался максимальный КПД.

Параметр	Ед. измерен.	$X=0$	$X=1$	$X=2$	$X=4$
N_g	Амага	0.10	0.12	0.14	0.18
Q_t	Дж/(л Амага)	74	56	37	28
Макс. КПД	%	17	23	25	27
Q_M	Дж/(л Амага)	290	230	125	115

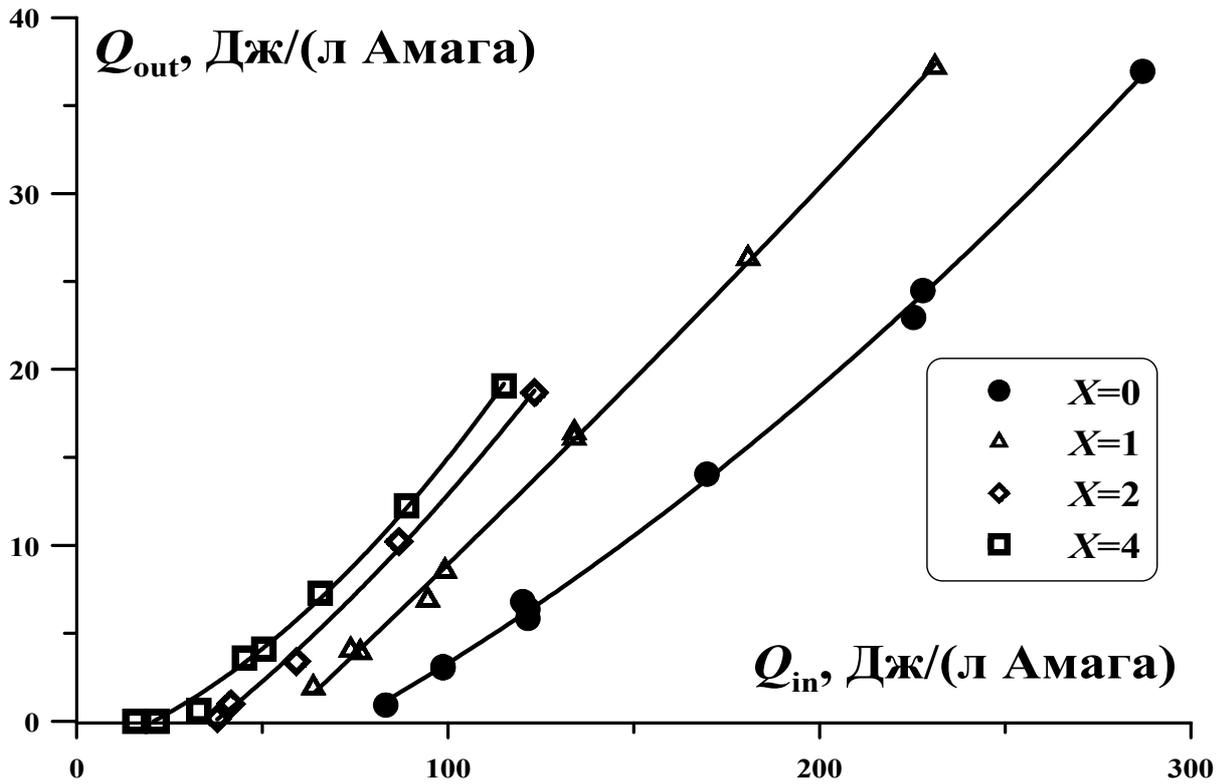


Рис.20. Зависимость удельного лазерного энергосъема Q_{out} от удельного энерговклада Q_{in} при различном содержании кислорода X в смеси $CO:He:O_2=1:4:X$.

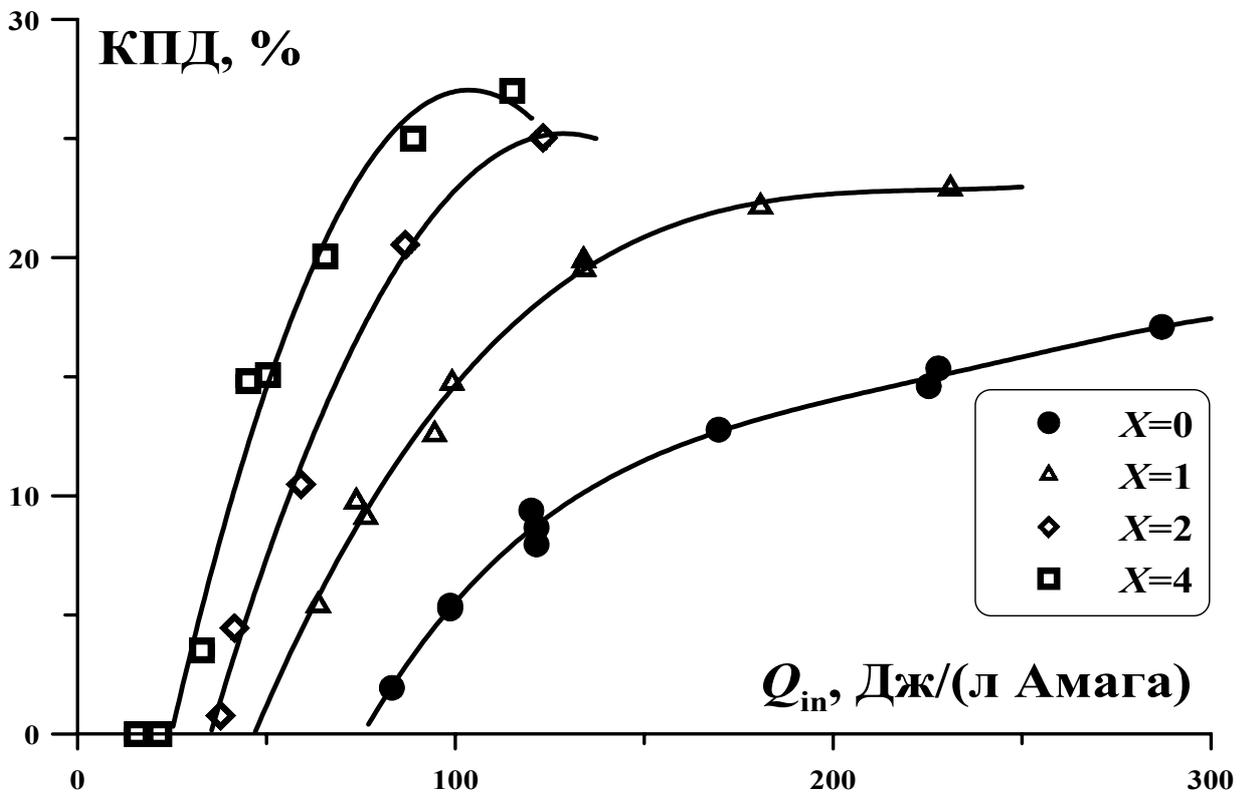


Рис.21. Зависимость КПД лазера от величины удельного энерговклада при различном содержании кислорода X в смеси $CO:He:O_2=1:4:X$.

Рассмотрим, как меняются энергетические характеристики излучения импульсного ЭИ СО-лазера на переходах первого колебательного обертона $V+2 \rightarrow V$ молекулы СО при увеличении содержания кислорода X в лазерной смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$. Высокочастотный лазерный резонатор длиной ~ 2.5 м был образован сферическим зеркалом с радиусом кривизны 10 м и плоским выходным зеркалом, установленными непосредственно на ЭИ разрядной камере. Оба зеркала имели многослойное диэлектрическое покрытие с коэффициентом отражения $\sim 99\%$ в диапазоне длин волн 2.6-3.0 мкм и с высоким коэффициентом пропускания в диапазоне длин волн 5-6 мкм. Выходная апертура лазерного излучения была ограничена круглой диафрагмой диаметром 36 мм. Обертонный СО-лазер действовал в многочастотном режиме генерации излучения. На **Рис.22** представлены значения удельного лазерного энергосъема Q_{out} при различном содержании кислорода X в рабочей смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$. При увеличении количества молекулярного кислорода X от 0 до 4 пороговый энерговклад Q_t уменьшался от 70 до 30 Дж/(л Амага).

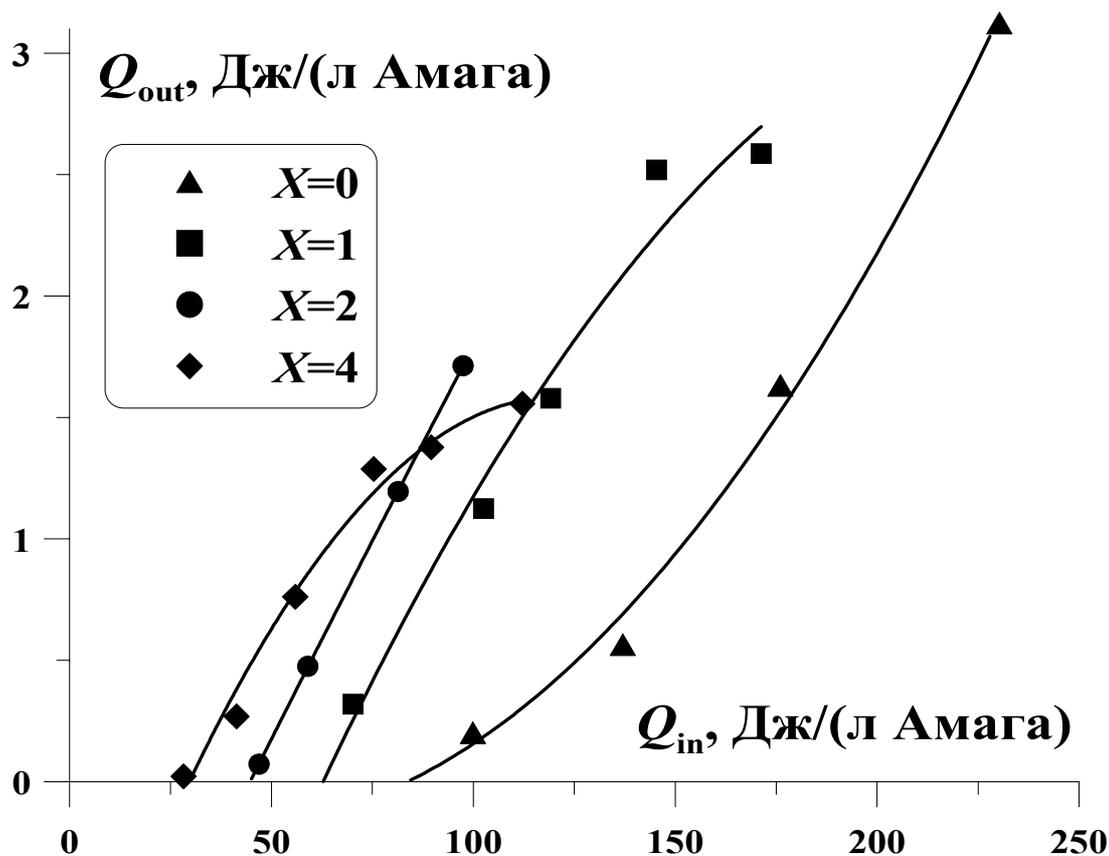


Рис.22. Зависимость энергосъема Q_{out} обертоного СО-лазера от удельного энерговклада Q_{in} при различном содержании кислорода X в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$.

В тот же лазерный резонатор, который был далеко не оптимальным, поскольку имел малый коэффициент вывода излучения, была помещена азотсодержащая рабочая смесь $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:10$, а затем рабочая смесь была заменена на смесь $\text{CO}:\text{Воздух} = 1:12$, для которой воздух брался из атмосферы. На **Рис.23** и **Рис.24** представлены значения лазерного энергосъема Q_{out} и КПД обертонного СО-лазера на этих рабочих смесях. Наиболее высокие выходные характеристики обертонного СО-лазера продемонстрировала рабочая смесь $\text{CO}:\text{Воздух} = 1:12$, что открывает возможность для использования воздушных смесей в качестве активной среды как компактных импульсно-периодических СО лазеров [59, 60], так и мощных ЭИ СО-лазеров.

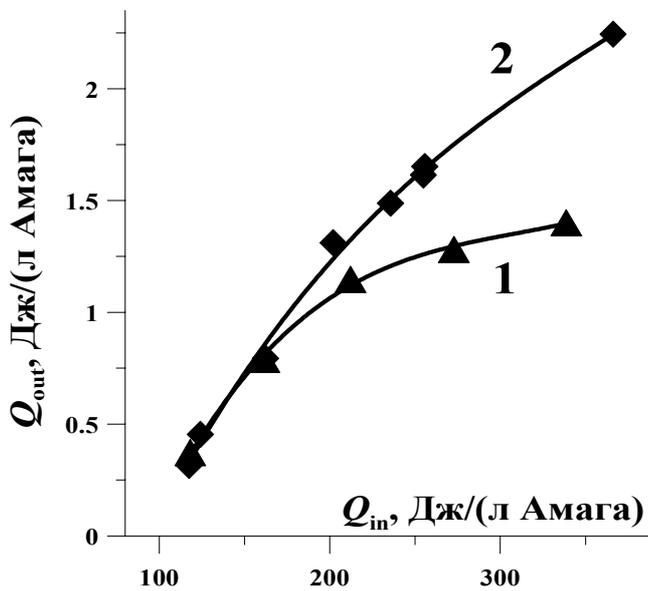


Рис.23. Зависимость лазерного энергосъема Q_{out} от удельного энерговклада Q_{in} для обертонного СО лазера с рабочей смесью
1) $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:10$;
2) $\text{CO}:\text{Воздух} = 1:12$.

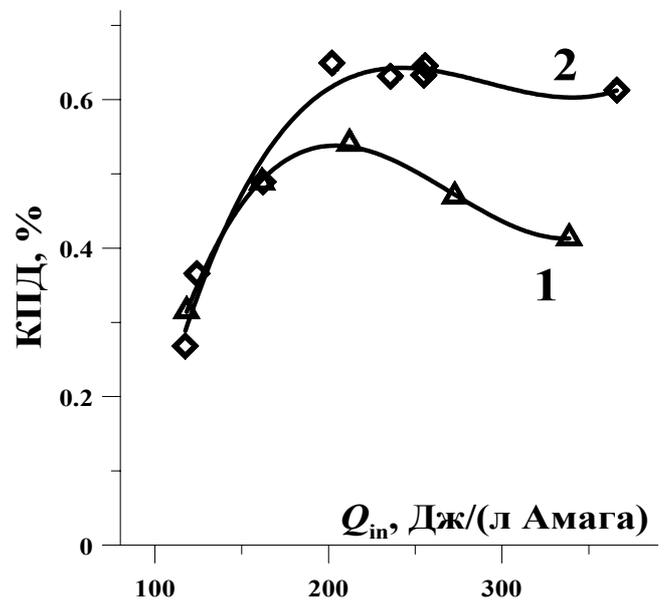


Рис.24. Зависимость лазерного КПД от удельного энерговклада Q_{in} для обертонного СО лазера с рабочей смесью
1) $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:10$;
2) $\text{CO}:\text{Воздух} = 1:12$.

6. Заключение

Проведенное исследование показало, что добавление молекулярного кислорода в рабочую смесь импульсного ЭИ СО-лазера значительно влияет на коэффициент усиления активной среды и выходные характеристики такого лазера. Обнаружено, что при добавлении кислорода в гелиевую рабочую смесь $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ в количестве $X=2$ пиковое значение КУСС увеличивается многократно на «низкорасположенных» колебательных переходах $V+1 \rightarrow V$ для V

от 6 до 13. Такое увеличение КУСС связано, прежде всего, с увеличением населенности соответствующих колебательных уровней. На «высокорасположенных» колебательных переходах $V > 17$ добавление кислорода только уменьшало коэффициент усиления, причем в рабочей смеси с содержанием кислорода $X \geq 1$ излучение на таких переходах не усиливалось, а только поглощалось. Временные параметры динамики КУСС на всех зондированных переходах уменьшались при увеличении содержания кислорода, а газовая смесь при этом нагревалась до более высокой температуры после импульсной накачки при одинаковой величине удельного энергозатрата.

По нашему мнению, наблюдаемые изменения временной динамики КУСС в активной среде лазерного усилителя можно объяснить на основе кинетических процессов внутримолекулярного VV -обмена молекул CO и межмолекулярного VV' -обмена между молекулами CO и O₂. Поскольку молекулы кислорода имеют более высокую скорость колебательно-поступательной релаксации, то такой межмолекулярный обмен увеличивает скорость релаксации колебательной энергии, запасенной молекулами CO. При этом межмолекулярный VV' -обмен играет роль преграды на уровнях $V \sim 20$ для заселения «высокорасположенных» колебательных уровней CO, но вместе с тем способствует накоплению молекул CO на «низкорасположенных» колебательных уровнях. Поэтому при увеличении содержания кислорода в рабочей смеси значения КУСС на «низкорасположенных» колебательных переходах возрастают, а на «высокорасположенных» переходах уменьшаются. Наряду с этим, временные параметры динамики КУСС уменьшаются на всех переходах.

Исследование генерационных характеристик импульсного ЭИ CO-лазера показало, что в рабочей смеси CO:He:O₂ = 1:10:X при увеличении содержания кислорода до $X=4$ уменьшается значение порогового энергозатрата для лазера, действующего, как на основных колебательных переходах $V+1 \rightarrow V$ молекулы CO, так и на переходах первого колебательного обертона $V+2 \rightarrow V$. Обнаружено, что при добавлении кислорода увеличивается максимальное значение КПД лазера на основных переходах, причем максимум КПД достигается при меньших значениях удельного энергозатрата. Продемонстрировано, что импульсный ЭИ CO-лазер может действовать на воздушной рабочей смеси, причем даже на переходах первого колебательного обертона молекулы CO. Тем самым открывается возможность для использования воздушных смесей в качестве активной среды как компактных импульсно-периодических CO лазеров, так и мощных, в том числе мобильных, ЭИ CO-лазеров.

Авторы выражают признательность профессору А.П. Напартовичу, к.ф.-м.н А.К. Курносову, к.ф.-м.н И.В. Кочетову, за обсуждение результатов данного исследования, а также Р.П. Андрусенко за участие в экспериментах. Работа частично поддержана Российским Фондом Фундаментальных Исследований (РФФИ 05-02-17656, 06-02-08041-офи, 07-05-00765).

Литература

1. Patel C.K.N., Kerl R.J., *Appl.Phys.Lett.*, **5**(4), 81 (1964).
2. Алейников В.С., Масычев В.И. «Лазеры на окиси углерода». М., Радио и связь, 1990.
3. Ионин А.А. «Лазеры на окиси углерода с накачкой электрическим разрядом». В кн. “Энциклопедия низкотемпературной плазмы” Сер. Б, Том XI-4, под ред. С.И. Яковленко. М., Физматлит, 2005, с.740
4. Ionin A.A. «Electric Discharge CO Lasers». In «Gas Lasers». Ed. by M. Endo and R.F. Walter. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2007.
5. Schulz G.J., *Phys. Rev.*, **135**, 988 (1964).
6. Treanor C.E., Rich J.W., Rehm R.G., *J. Chem.Phys.*, **48**, 1798 (1968).
7. Rich J.W., *J. Appl.Phys.*, **42**, 2719 (1971).
8. Соболев Н.Н., Соковиков В.В. *УФН*, **110**, 191 (1973).
9. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. «Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры». М., Наука, 1980.
10. Рич Дж.У. В кн. «Газовые лазеры». Под ред. И. Мак-Даниэля и У. Нигэна. М., «Мир», 1986, с. 125.
11. Djeu N., *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 309 (1973).
12. Yardley J.T., *J. Molec. Spectr.*, **35**, 314 (1970).
13. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квант. электрон.*, **30**, 771 (2000)
14. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квант. электрон.*, **30**, 859 (2000).
15. Basov N.G., Hager G.D., Ionin A.A., et al., *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-36**, 810 (2000).
16. Bhaumik M.L., Lacina W.B., Mann M.M., *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-8**, 150 (1972).
17. Mann M.M., Rice D.K., Eguchi R.G., *IEEE J. Quant. Electron.*, **QE-10**, 682 (1974).
18. Mann M.M., *AIAA Journal*, **14**, 549 (1976).
19. Басов Н., Бакаев В., Ионин А. и др. *ЖТФ*, **55**, 326 (1985).
20. Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квант. электрон.*, **37**, 111 (2007).
21. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю и др. *Квант. электрон.*, **36**, 1153 (2006).
22. Osgood R.M., Eppers W.C. Nichols E.R., *IEEE. J. Quant. Electron.*, **6**, 145, (1970).
23. Murray G.A., Smith A.L., *J.Phys.D.*, **14**, 1745. (1981).
24. Григорян Г.М., Дымшиц Б.М., Ионих Ю.З. *Квант. электрон.*, **16**, 1377 (1989).
25. Григорян Г.М., Дымшиц Б.М., Ионих Ю.З. *Квант. электрон.*, **17**, 669 (1990).
26. Очкин В.Н., Савинов С.Ю., Соболев Н.Н., Трубочеев Э.А. *Квант. электрон.*, **1**, 573 (1974).
27. Трубочеев Э.А. *Труды ФИАН*, **102**, 3 (1977).
28. De Benedictis S., Cramarossa F., D’Agostino R., *J.Phys.D: Appl. Phys.*, **18**, 413 (1985).
29. Morgan W.L., Fisher E.R., *Phys. Rev. A*, **16**, 1186 (1977).

30. Kagan Yu.M. Kaufman Y., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **16**, 1687 (1983).
31. Григорян Г.М., Дымшиц Б.М., Ионих Ю.З. *Оптика и спектроскопия*, **65**, 766 (1988).
32. Sato Y., Tsuchiya S., *J. Phys. Soc. Japan*, **33**, 1120 (1972).
33. Taine A., *Chem. Phys. Lett.*, **41**, 297 (1976).
34. Басов Н.Г., Кипшакбаев А.И., Ковш И.Б., Пантелеев В.И. *ЖТФ*, **56**, 1573 (1986).
35. Kanazawa H., Yamaguchi N., Nakajima T., Taira T., *Rev. Sci. Instrum.*, **62**, 2379 (1991).
36. Urban W., *Infrared Phys. Technol.*, **36**, 465 (1995).
37. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. *Квант. электрон.*, **3**, 121 (1971).
38. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. *Письма в ЖЭТФ*, **14**, 545 (1971).
39. Klosterman E.L., Вугон S.R., *J. Appl. Phys.*, **50**, 5168 (1979).
40. Mayerhofer W., Henning W., Novack R., Hugel H., *Proc. 6th Int. Symp Gas Flow and Chemical Lasers*, Berlin, 1987, p.237-243.
41. Горшков И.И., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *КСФ*, №5, 31 (1989).
42. Ionin A.A., Kotkov A.A., Minkovsky M.G., et al., *Proc. SPIE*, **1397**, 453 (1990).
43. Dymshits B.M., Ivanov G.V., Mescherskiy A. N., Kovsh I.B., *Proc SPIE*, **2206**, 109 (1994).
44. Бородин А.М., Гурашвили В.А., Кузьмин В.Н. и др. *Квант. электрон.*, **23**, 315 (1996).
45. Бон В., фон Бюлов Х., Дасс Ш., Ионин А.А. и др. *Квант. электрон.*, **35**, 1126 (2005).
46. Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 982 (2003).
47. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Кочетов И.В. и др. Патент РФ №2206495 от 20.06.2003. *Бюлл. изобр*, №17, с. 658 (2003).
48. Вагин Н.П., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квант. электрон.*, **34**, 865 (2004).
49. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. *Квант. электрон.*, **37**, 231 (2007).
50. Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. В сб. «Научная сессия МИФИ-2005». М., 2005, Сб. научных трудов, т. **4**, с. 26.
51. Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., et al., *Laser Optics 2006: High-Power Gas Lasers*, Proc. SPIE, Vol. **6611**, p. 66110H (2007).
52. Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., et al., XVI Int. Symp. on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, Proc. SPIE, Vol. **6346**, p.63463D (2007).
53. Басов Н.Г., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квант. электрон.*, **32**, 404 (2002).
54. Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квант. электрон.*, **35**, 1107 (2005).
55. Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. Препринт ФИАН №13. М., 2005. См. также Vetoshkin S.V., Ionin A.A., Klimachev Yu.M., et al., *J. Russian Laser Research*, **27**, 33 (2006).
56. Елкин Н.Н., Кочетов И.В., Курносков А.К., Напартович А.П. *Квант. электрон.*, **17**, 313 (1990).
57. Plönjes E., Palm P., Lee W., et al., *Chem. Phys.*, **260**, 353 (2000).
58. Елецкий А.В., Палкина Л.А., Смирнов Б.М. «Явления переноса в слабоионизированной плазме». М., Атомиздат, 1975.
59. Ionin A.A., Seleznev L.V., Shelestovich A.V., Sinitsyn D.V., XVI Int. Symp. on Gas Flow, Chemical Lasers, and High-Power Lasers, Proc. SPIE, Vol. **6346**, p.634605 (2007).
60. Ionin A.A., Seleznev L.V., Shelestovich A.V., Sinitsyn D.V., High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications, Proc. SPIE, Vol. **6454**, p.645406 (2007).

Список сокращений и обозначений

ВСУ - время существования усиления $G(t) > 0$	Q_t - пороговое значение уд. энерговклада
КПД лазера - эффективность преобразования энергии импульсной накачки в энергию лазерного излучения. $\text{КПД} = (Q_{\text{out}}/Q_{\text{in}}) 100\%$	T_0 - начальная температура газа
КУСС - коэффициент усиления слабого сигнала	T_g - локальная температура газа
КФР, f_V - колебат. функция распределения	t - время от начала импульса накачки
ЭИ - электроионизационный (разряд / лазер)	U_e - потенциал ионизации молекул
E_V - энергия колебат. перехода	V, V', W - колебат. число /переход /полоса
ΔE - постоянная ангармонизма молекулы	V_T - минимум триноровской КФР
$G(t)$ - временная динамика КУСС	V_T -релаксации - колебательно- поступательная релаксация
G_{max} - максимальное значения КУСС	VV -обмен - внутримолекулярный обмен
G_{peak} - пиковое значение КУСС	VV' -обмен - межмолекулярный обмен
J - вращательное число	w - расстояний от оси камеры
k - постоянная Больцмана	X - содержание кислорода в газовой смеси
L - длина активной среды	Δ_{01} - интервал времени, когда $G(t) > 0.1 G_{\text{max}}$
N_g - относительная плотность газа	Δ_{05} - интервал времени, когда $G(t) > 0.5 G_{\text{max}}$
N_{CO} - концентрация молекул CO	Δ_ϕ - время нарастания КУСС
N_V - населенность колебат. уровня V	Φ_V - поток колебат. энергии
$n_V = N_V/N_{\text{CO}}$ - относительная населенность	$\Theta_M(V)$ - колебат. температура молекулы M на колебат. уровне V
Q_{in} - среднее значение уд. энерговклада	λ - длина волны излучения
Q_{loc} - локальное значение уд. энерговклада	τ_{01} - момент времени, когда КУСС первый раз достигает значения $0.1 G_{\text{max}}$
Q_M - значение Q_{in} , при котором достигается максимальный КПД лазера	τ_{09} - момент времени, когда КУСС первый раз достигает значения $0.9 G_{\text{max}}$.
Q_{out} - уд. лазерный энергосъем	

Содержание

1. Введение	3
2. Экспериментальная установка	6
3. Временная динамика КУСС	7
3.1. Исходная гелиевая смесь CO:He	7
3.2. Кислородсодержащие гелиевые смеси	10
3.2.1. «Высокорасположенные» переходы	10
3.2.2. «Низкорасположенные» переходы	15
3.2.3. «Промежуточные» переходы	20
3.2. Азотные смеси с добавлением кислорода	22
4. Обсуждение экспериментальных данных по измерению КУСС	25
5. Импульсный ЭИ CO-лазер на кислородсодержащих газовых смесях	35
6. Заключение	39
Литература	41
Список сокращений и обозначений	43