

УДК 533.9.07

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВОЗДУХОМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОЗОнового СЛОЯ

Ю. А. Епишкин, Г. С. Мишин, В. П. Пугачев, Ю. А. Соколов, В. А. Сухнев

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, г. Королев,
Московская обл., Россия

Н. В. Кравцов, Н. И. Наумкин, В. В. Фирсов

Научно-исследовательский институт ядерной физики, МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

На основе экспериментальных исследований показано, что изменение давления воздуха в диапазоне 10^3 – 10^5 Па оказывает слабое влияние на взаимодействие лазерного излучения с длинами волн от 762 до 766 нм с воздухом и образование синглетного кислорода.

В работе [1] были приведены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента поглощения лазерного излучения в диапазоне длин волн от 762 до 768 нм в воздухе при атмосферном давлении. Поскольку воздействие лазерного излучения на воздух при фактическом осуществлении активного способа восстановления озонового слоя [2] более вероятно на высотах 20–30 км, то исследование влияния давления на рассматриваемый процесс имеет первостепенное значение. Ниже изложены результаты экспериментальных исследований по определению величины коэффициента поглощения лазерного излучения в зависимости от давления воздуха в диапазоне $2,5 (10^3–10^5)$ Па. Этот диапазон соответствует высотам (H) от 25 до 0 км.

Изменение давления в барокамере обеспечивалось форвакуумными насосами. Поскольку в работе [1] было показано, что коэффициент поглощения воздухом лазерного излучения K максимален для излучения лазерного диода с температурой $T_{\text{ла}} \sim 20$ °С, то приведенные ниже экспериментальные данные получены именно при $T_{\text{ла}} = 20$ °С.

Цикл измерений, проведенных при атмосферном давлении, показал, что экспериментальная погрешность определения отношения $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ не превышает $\sim 2\%$. Здесь $I_{\text{пр}}$ обозначен ток в фотоприемнике, пропорциональный интенсивности входящего в прибор излучения, а через ток $I_{\text{отр}}$ — ток, пропорциональный интенсивности излучения уходящего из прибора.

Зависимость $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ от давления окружающего воздуха P приведена на рис. 1. Анализ этих данных показывает, что в диапазоне давлений от 10^5 до $5,5 \cdot 10^3$ Па величина $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ изменяется не более чем на 2,5 %. При $P = 2,5 \cdot 10^3$ Па отличие отношения $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ от соответствующего значения для $P = 10^5$ Па составляет $\sim 4,5$ %. Если учесть, что при $P = 5,5 \cdot 10^3$ Па $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ на 1,8 % ниже значения $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ при $P = 10^5$ Па, а при $P = 2,5 \cdot 10^3$ Па выше на 4,5 %, то можно считать, что с погрешностью не более ± 5 % $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ не зависит от давления воздуха в диапазоне $2,5 \cdot (10^3–10^5)$ Па.

Согласно определению, величина $I_{\text{отр}}$ пропорциональна энергии, входящей из лазерного устройства [1] через отверстие в зеркале. Эта энергия в свою очередь представляет собой входящую в устройство энергию за вычетом поглощений и рассеянной внутри устройства. Рассеяние лазерной энергии имеет место за счет различных факторов. Это рассеяние фотонов на молекулах воздуха, расширение лазерного луча, определяемое системой фокусировки, отклонение этого луча от расчетной траектории. Последние два фактора при измерении величины $I_{\text{отр}}$ в указанном диапазоне давле-

ний оставались постоянными. Рассеяние фотонов на молекулах воздуха, как показано ниже, для используемого устройства пренебрежимо мало. Таким образом, изменение $I_{отр}$ в описываемых экспериментах могло иметь место лишь за счет влияния давления на поглощенную в лазерном устройстве энергию. Проведенные оценки показали, что в исследованном диапазоне давлений изменение поглощенного в лазерном устройстве излучения заведомо не превышает нескольких процентов, т. е. находится в пределах точности измерений.

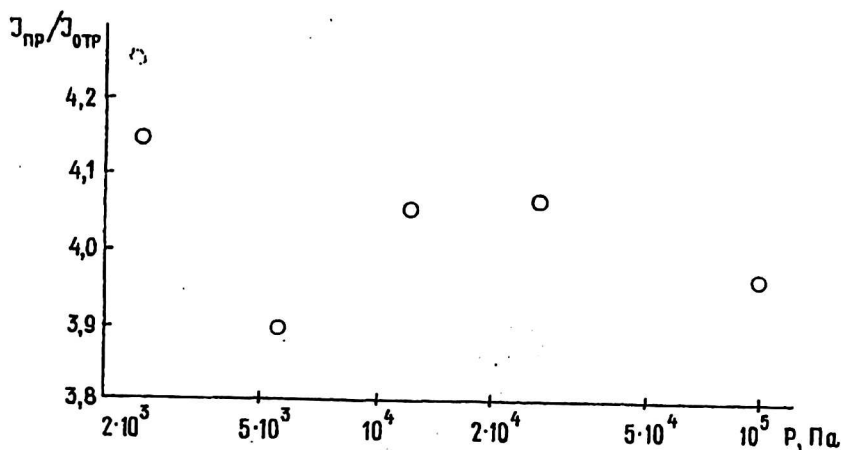


Рис. 1. Зависимость отношения $I_{пр}/I_{отр}$ от давления воздуха

Полученный результат позволяет распространить полученные в работе [1] данные по взаимодействию лазерного излучения с воздухом при атмосферном давлении на диапазон высот до 25 км.

В работе [3] было получено, что при воздействии лазерного излучения на воздух при атмосферном давлении образуется синглетный кислород, который при переходе в нормальное состояние генерирует излучение с длинами волн λ_m : 760,25, 764, 766 нм. Экспериментальные исследования были проведены на аппаратуре лазерного диода $T_{ла} = 20$ и 23 °С.

Согласно сказанному выше, практическая реализация метода восстановления озона [2] будет осуществляться на высотах $H = 20-30$ км. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование возможности образования синглетного кислорода при воздействии лазерного излучения на воздух при давлениях от 10^5 до $5 \cdot 10^2$ Па. При температуре лазерного диода $T_{ла} = 20$ °С при помощи спектрометра "Кварц-Вд", описание которого дано в работе [3], были определены зависимости от длин волны интенсивности излучения, выходящего из объема, окружающего зону, в которой лазерное излучение взаимодействовало с воздухом. Спектрометр устанавливался в двух позициях так, что его ось была на расстояниях $y = -0,5$ мм и $y = 13,5$ мм от центра зоны, где лазерное излучение воздействовало на воздух. Подробное описание схемы эксперимента дано в работе [3].

В качестве примера на рис. 2 для $y = -0,5$ мм и $y = 13,5$ мм показаны зависимости интенсивности излучения, выходящего из исследуемого объема, от длины волны для разных значений давления в барокамере. Видно, что полученные зависимости в ряде случаев имеют двухпиковый характер. В работе [3] каждый пичок излучения характеризовался длиной волны λ_m , при которой достигается максимум интенсивности, и величиной максимума интенсивности I_m . Используем такой же подход и в настоящей работе. На рис. 3 приведены зависимости I_m от давления P для $y = -0,5$ мм (светлые значки) и для $y = 13,5$ мм (темные значки). Видно, что с учетом экспериментальной

погрешности зависимость λ_m от P в обоих случаях практически отсутствует в диапазоне давлений от $5 \cdot 10^2$ до 10^5 Па. При этом следует подчеркнуть, что значения l_m при пониженных давлениях от давлений от $5 \cdot 10^2$ до $1,7 \cdot 10^4$ Па определялись последовательным изменением давления в течение короткого промежутка времени при неизменном положении спектрометра, что сводило к минимуму систематическую погрешность определения l_m . Значения же l_m при $P = 10^5$ Па определялись в других экспериментах и на их отличие от значений l_m при пониженных давления могла влиять систематическая погрешность.

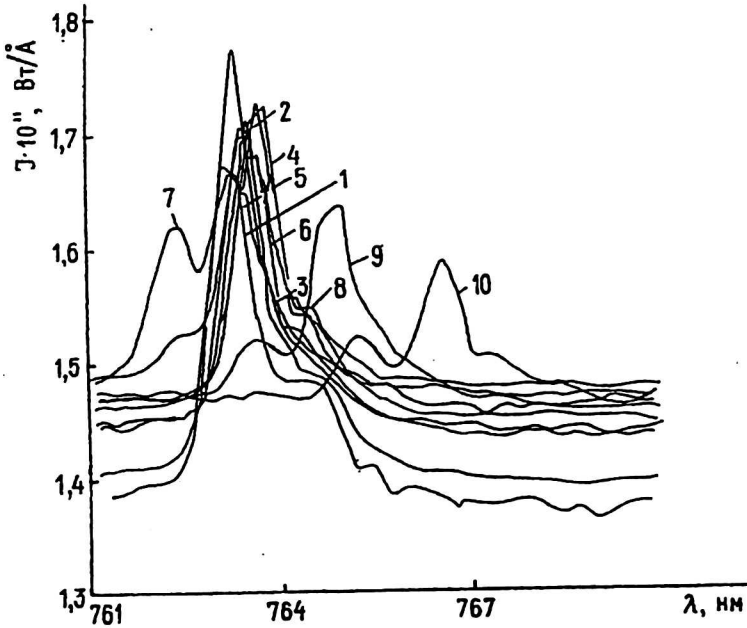


Рис. 2. Зависимости от длины волны интенсивности излучения из объема лазерного устройства:

- 1 — $y = -0,5$ мм, $P = 5 \cdot 10^2$ Па; 2 — $y = -0,5$ мм, $P = 1,8 \cdot 10^3$ Па; 3 — $y = -0,5$ мм, $P = 10^4$ Па;
 4 — $y = 13,5$ мм, $P = 5 \cdot 10^2$ Па; 5 — $y = 13,5$ мм, $P = 1,8 \cdot 10^3$ Па; 6 — $y = 13,5$ мм, $P = 1,67 \cdot 10^4$ Па; 7 — $T_{\text{лд}} = 16$ °С; 8 — $T_{\text{лд}} = 18$ °С; 9 — $T_{\text{лд}} = 23$ °С; 10 — $T_{\text{лд}} = 29$ °С

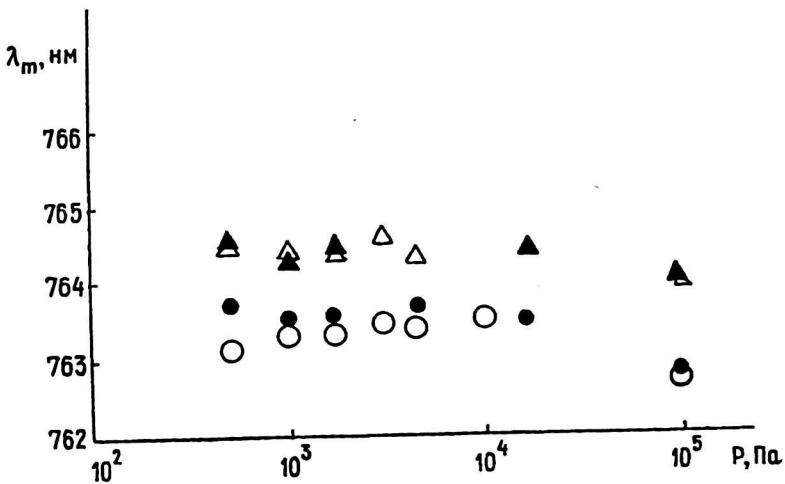


Рис. 3. Зависимость длины волны в максимуме интенсивности пиков от давления воздуха

На рис. 4 приведены зависимости от давления величины J_m для $y = -0,5$ мм (светлые значки) и $y = 13,5$ мм (темные значки). Видно, что величина J_m , соответствующая $l_m = 764,3$ нм от давления практически не зависит, а величина J_m , соответствующая $l_m = 763,5$ нм изменяется заметно, особенно для случая $y = -0,5$ мм. В работе [3] было показано, что излучение с $l_m = 763,5$ нм может быть идентифицировано как рассеянное излучение лазерного диода, а излучение с $l_m = 764$ нм является излучением синглетного кислорода.

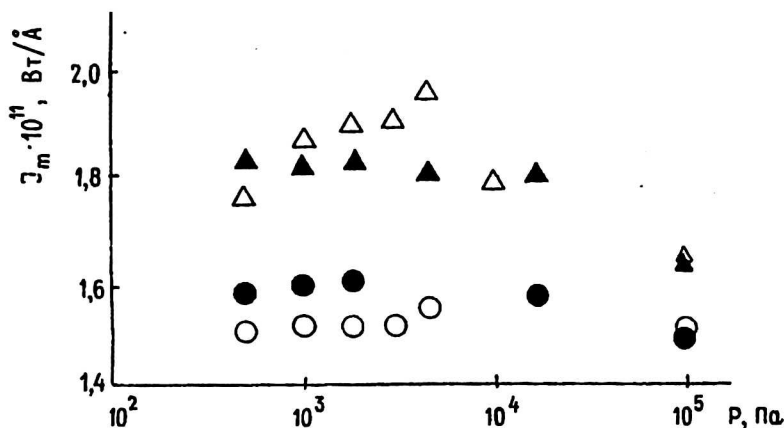


Рис. 4. Зависимость максимального значения интенсивности пиков от давления воздуха (Форма знаков соответствует данным, приведенным на рис. 3)

Анализ приведенных данных показывает, что с разбросом, не превосходящим $\pm 3,5$ %, величину J_m , соответствующую $l_m = 763,5$ нм для обоих значений y , можно считать не зависящей от давления в диапазоне $5 \cdot (10^2 - 10^5)$ Па, т. е. во всем диапазоне практического применения активного метода восстановления озона [2].

Рассмотрим этот факт более подробно.

Изменения интенсивности лазерного излучения за счет рассеяния при прохождении полного пути L в лазерном устройстве [1]

$$J = J_0 l^{-L/L_R},$$

где J_0 — интенсивность излучения на выходе из лазерного диода;

L_R — длина упругого рассеяния.

Согласно данным работы [4], имеем, что

$$L_R \approx (\sigma_R \sqrt{n_\phi n_B})^{-1},$$

где σ_R — полное сечение рэлеевского рассеяния;

n_ϕ — плотность фотонов лазерного излучения;

n_B — количество молекул воздуха в единице объема.

Величина n_B при давлении P может быть выражена в виде

$$n_B = n_{B-a} (P / P_a),$$

где $n_{в.а}$ — количество молекул воздуха в единице объема при атмосферном давлении P_a .

Имеем, что

$$J = J_0 l^{-\xi} \sqrt{P/P_a},$$

$$\text{где } \xi = L\sigma_R \sqrt{n_\phi} \sqrt{n_{в.а}}.$$

При атмосферном давлении $J_a = J_0 l^{-\xi}$.

Изменение интенсивности за счет изменения давления можно охарактеризовать отношением J / J_a .

$$J / J_a = l^{\xi(1-\sqrt{P/P_a})}.$$

Для исследованного диапазона давлений имеем, что

$$(1 - \sqrt{P/P_a}) \leq 0,9.$$

Оценки, проведенные применительно к используемому лазерному устройству показали, что величина ξ значительно меньше единицы и изменение J / J_a не превышает $\sim 1\%$.

Анализ приведенных на рис. 4 данных показывает, что для излучения синглетного кислорода с $l_m = 764,3$ нм максимальное значение интенсивности J_m с уменьшением давления возрастает в диапазоне от 10^5 до $\sim 5 \cdot 10^3$ Па, а затем остается приблизительно постоянным для $y = 13,5$ мм и слабо уменьшается для $y = -0,5$ мм. Рост величины J_m обусловлен, по-видимому, увеличением концентрации синглетного кислорода за счет увеличения времени жизни возбужденных молекул при понижении давления. Стабилизация или слабое падение J_m при дальнейшем уменьшении давления может быть вызвано тем, что количество возбужденных молекул уменьшается за счет падения плотности воздуха. Этот факт наиболее ярко проявляется при $y = -0,5$ мм, т. е. в зоне, где осуществляется взаимодействие лазерного излучения с воздухом.

Сравнение полученных результатов с изложенными в работе [3] показывает, что в излучении, исходящем из объема лазерного устройства при давлении от $1,8 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^2$ Па для $y = -0,5$ мм и $y = 13,5$ мм не наблюдаются пички с $l_m = 761,5$ нм, соответствующие рассеянному излучению лазерного диода. Для тех же условий не наблюдается излучение синглетного кислорода с $l_m = 760,25$ нм, имевшее место при атмосферном давлении. Одной из возможных причин отсутствия таких пичков является тот факт, что при понижении давления воздуха возрастает интенсивность фонового излучения J_ϕ , имеющего место при значениях l , лежащих вне диапазона, в котором расположены пички интенсивности. Так, согласно данным работы [3], при $T_{\lambda\lambda} = 20$ °С и $P = 10^5$ Па $J_\phi = 1,34 \cdot 10^{11}$ Вт/Å для $y = -0,5$ мм и $J_\phi = 1,38 \cdot 10^{11}$ Вт/Å для $y = 13,5$ мм. Интенсивность синглетного кислорода (J_m) с $l_m = 760,25$ нм при $P = 10^5$ Па находилось в пределах от $1,36 \cdot 10^{11}$ до $1,45 \cdot 10^{11}$ Вт/Å.

В то же время при изменении давления от $1,8 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^2$ Па было получено, что $J_\phi = 1,37 \cdot 10^{11}$ Вт/Å ... $1,45 \cdot 10^{11}$ Вт/Å для $y = -0,5$ мм и $J_\phi = 1,46 \cdot 10^{11}$ Вт/Å ... $1,5 \cdot 10^{11}$ Вт/Å для $y = 13,5$ мм.

В целях более подробного исследования влияния давления воздуха на процесс взаимодействия с лазерным излучением, были получены зависимости от длины волны интенсивности излучения, выходящего из объема лазерного диода $T_{\text{лд}}$ при давлении $P = 5 \cdot 10^2$ Па для $y = 13,5$ мм.

В качестве примера некоторые из этих зависимостей приведены на рис. 2, а на рис. 5 и 6 даны соответственно зависимости l_m и J_m от $T_{\text{лд}}$. Сравнение приведенных данных с результатами работы [3] позволило установить, что значения l_m при $P = 5 \cdot 10^2$ Па отличаются от значений λ_m для собственного и рассеянного воздуха при атмосферном давлении излучения лазерного диода примерно на $\Delta l \approx 0,3$ нм. С учетом погрешности экспериментов можно считать, что изменение давления воздуха в диапазоне от $5 \cdot 10^2$ до 10^5 Па практически не оказывает влияния на зависимость l_m от $T_{\text{лд}}$. Сильная зависимость J_m от $T_{\text{лд}}$ на рис. 6 для пиков с $l_m = 763,5; 762,5; 765,2$ нм подтверждает, что они обусловлены рассеянным излучением лазерного диода. Величина J_m для $l_m = 764,5$ нм при $T_{\text{лд}} = 17-20$ °С от температуры лазерного диода практически не зависит, что подтверждает обнаруженное как в работе [3], так и в настоящей работе существование излучения синглетного кислорода с $l_m = 764,3$ нм.

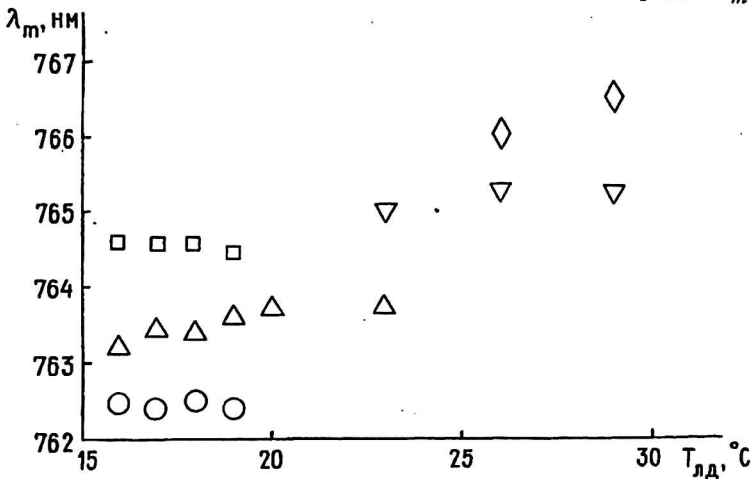


Рис. 5. Зависимость длины волны в максимуме интенсивности пиков от температуры лазерного диода при давлении воздуха $5 \cdot 10^2$ Па

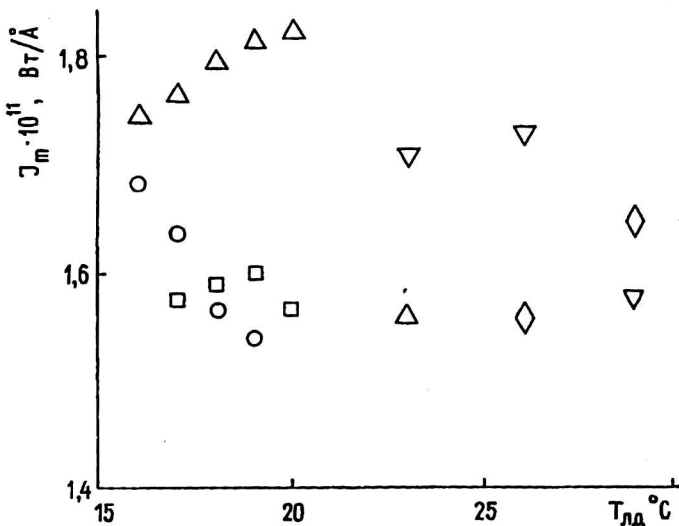


Рис. 6. Зависимость максимального значения интенсивности пиков от температуры лазерного диода при давлении воздуха $5 \cdot 10^2$ Па

Л и т е р а т у р а .

1. Кравцов Н. В., Епишкин Ю. А., Мишин Г. С., Наумкин Н. И., Пугачев В. П., Соколов В. А., Сухнев В. А., Фирсов В. В. Исследование взаимодействия лазерного излучения с кислородом воздуха при моделировании процесса восстановления озонового слоя // Прикладная физика, 1997. Вып. 4.

2. Старик А. М. О проблеме сохранения озонового слоя Земли при продолжающемся антропогенном загрязнении атмосферы // Там же, 1996. Вып. 1.

3. Епишкин Ю. А., Кравцов Н. В., Мишин Г. С., Наумкин Н. И., Пугачев В. П., Соколов Ю. А., Сухнев В. А., Фирсов В. В. Исследование возможности образования синглетного кислорода под воздействием лазерного излучения при моделировании процесса восстановления озонового слоя в атмосфере // Там же, 1998. Вып. 1.

4. J n a b a H. Detection of Atoms and Molecules by Raman Scattering and Resonance Fluorescence Laser Monitoring of the Atmosphere, E. D. Hinkley, Ed., Springer-Verlag, 1976.

Исследования, результаты которых изложены в данной статье, проведены на средства, предоставленные генеральным директором ЗАО «Промышленно-строительная фирма "СММ"» М. Т. Сыроевым, которому авторы выражают самую искреннюю благодарность.

SIMULATION OF THE O₃ LAUER REGENERATION AND INVESTIGATIONS OF THE EFFECT OF THE AIR PRESSURE ON INTERACTION BETWEEN LASER RADIATION AND AIR

Ju. A. Epischkin, T. S. Mishin, V. P. Pougatchov, Yu. A. Sokolov, V. A. Suhnev

Central Scientific Reseach Institute of Mashine-building, Koroliov, Russia

N. U. Kravtsov, N. I. Naumkin, V. V. Firsov

Nuclear Physics Institute, Moscow State University, Moscow, Russia

It has been observed experimentally that variations of the air pressure within the range of 10^3 – 10^5 Pa are found to have only a slight effect on the laser radiation (with a wavelength from 762 nm to 766 nm) when in contact with air and affect but scarcely the formation of the singlet oxygen.