

## Рефракция лазерного излучения в плазме непрерывного оптического разряда в потоке газа при атмосферном давлении

В.П. Зимаков, В.А. Кузнецов, А.Ю. Кедров,  
Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов\*

*Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН  
119526, г. Москва, пр. Вернадского, 101, корп. 1*

Поступила в редакцию 17.08.2009 г.

Приведены результаты экспериментального исследования рефракции поддерживающего лазерного излучения в непрерывном оптическом разряде (НОР), стабилизированном в сфокусированном лазерном луче ( $f/4,4$ ) и коаксиальном потоке газа при атмосферном давлении. Одновременно регистрировалось пространственное распределение интенсивности оптического излучения плазмы НОР и распределение интенсивности поддерживающего НОР лазерного излучения ( $M^2 = 6,6$ ), прошедшего через плазму. Рефракция лазерного излучения на угол до  $0,06$  рад наблюдалась при малых скоростях потока, когда граница плазмы находилась в сечении лазерного луча, имеющем размер, близкий к поперечному размеру плазмы. Состояние НОР в этом случае неустойчиво, при дальнейшем уменьшении скорости потока развивались колебания и плазма гасла. В основном диапазоне скоростей потока от  $1,5$  до  $10$  м/с и выше плазма была устойчива, а рефракция лазерного излучения не превышала нескольких миллирадиан и не влияла на характеристики плазмы.

*Ключевые слова:* непрерывный оптический разряд, НОР, лазерный плазматрон, поглощение и рефракция лазерного излучения в плазме; continuous optical discharge (COD), laser plasmatron, absorption and diffraction of laser radiation in plasma.

### Введение

Впервые непрерывный оптический разряд (НОР) был предсказан теоретически и получен экспериментально в ИПМех РАН в 1969–1970 гг. [1, 2]. С тех пор проводятся теоретические и экспериментальные исследования НОР, оригинальные результаты и обзоры которых можно найти в [3–15]. Исследованы свойства плазмы НОР, определены условия его поддержания, в основном разработаны теоретические модели и методы расчета характеристик НОР в сложных условиях плазменных генераторов для различных применений [6]. Изучаются возможности применений НОР, как правило довольно экзотических, например в лазерных реактивных двигателях [7], термоэмиссионном преобразователе энергии лазерного излучения в электричество [8] или плазмохимическом реакторе для выращивания поликристаллических алмазов [9].

Тем не менее НОР представляет собой сложную плазмодинамическую систему, требующую дальнейшего изучения. Известно, например, что плазма НОР

воздействует на поддерживающее ее лазерное излучение, вызывая ослабление интенсивности последнего вследствие поглощения и рефракции. Происходит самовоздействие плазмы, вследствие которого меняются условия ее поддержания, могут развиваться колебания, приводящие к погасанию плазмы. При этом влияние рефракции не так однозначно, как влияние поглощения, поскольку связано не только с наличием свободных электронов, но и с их пространственным распределением в зоне лазерного луча. В некоторых случаях влияние рефракции может оказаться определяющим.

Различные проявления рефракции в НОР были отмечены во многих экспериментальных и теоретических работах, например в [3, 8, 10–13], однако экспериментальные результаты в этой области до сих пор немногочисленны и носят, в основном, качественный характер. Кроме того, анализ проходящего через НОР излучения, в принципе, позволяет уточнить распределение концентрации электронов в наиболее горячей центральной части НОР, где спектральные методы дают максимальные погрешности. Такого рода уточнения имеют большое значение для возможности применения НОР в качестве эталонного объекта для проверки численных расчетов и теоретических моделей высокотемпературной газодинамики.

Основная цель данного исследования заключается в отработке экспериментальных методов, позволяющих одновременно регистрировать распределение температуры в НОР и рефракцию поддерживающего

\* Владимир Павлович Зимаков; Владимир Алексеевич Кузнецов (kuznetsov@lantanlaser.ru); Андрей Юрьевич Кедров (kedrov@lantanlaser.ru); Николай Германович Соловьев (solovyov@lantanlaser.ru); Андрей Николаевич Шемякин (shemyakin@lantanlaser.ru); Михаил Юрьевич Якимов (yakimov@lantanlaser.ru).

НОР лазерного излучения. В качестве объекта исследования был выбран НОР в режиме лазерного плазмотрона в потоке аргона при атмосферном давлении. С одной стороны, эта система исследовалась экспериментально в различной постановке в ряде работ [4, 14–16], что дает хорошие возможности для сравнения результатов. С другой стороны, изучение рефракции лазерного излучения в аргоне при атмосферном давлении не проводилось.

## 1. Экспериментальная установка и параметры излучения

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. В качестве источника излучения использовался специально разработанный и созданный  $\text{CO}_2$ -лазер мощностью до 4 кВт в непрерывном режиме с высокой стабильностью и симметрией выходного излучения [17].

Разработка основана на технологии комбинированного разряда, а именно разряда постоянного тока (РПТ), поддерживаемого емкостным импульсно-периодическим разрядом (ЕИР). Стабильность и однородность плазмы разряда, обеспечиваемые ЕИР, благоприятны для эффективного вклада энергии РПТ. Технология РПТ–ЕИР была реализована в схеме с быстрой осевой прокачкой со следующими преимуществами: высокая стабильность и симметрия выход-

ного луча наряду с эффективными возможностями управления параметрами излучения.

Мощности лазера до 4 кВт в непрерывном режиме достаточно для поддержания НОР в различных газах при атмосферном и более высоком давлениях. В сфокусированном луче плазма легко инициируется внесением металлической проволочки в область фокуса. В наших экспериментах для фокусировки лазерного излучения использовалась просветленная менисковая линза из  $\text{ZnSe}$  с фокусным расстоянием  $F = 97$  мм. Оптическая ось проходила коаксиально через сопло диаметром 18,5 мм, в область фокуса подавался поток аргона. Точка фокуса располагалась на расстоянии 17 мм от среза сопла, так что НОР находился целиком в атмосфере подаваемого газа. Скорость подаваемого потока могла меняться в диапазоне от 0 до 10 м/с и более. Отсутствие подмешивания атмосферного воздуха в струю подаваемого газа проверялось спектроскопически. Параметры лазерного излучения показаны в виде профиля интенсивности на линзе (рис. 1, а) и формы луча вблизи фокальной перетяжки (рис. 1, б). Диаметр пучка  $D$  на линзе и  $d(Z)$  вблизи перетяжки определялся методом вычисления вторых моментов распределений интенсивности [18], полученных прямыми измерениями с помощью прибора UFF-100 фирмы Prometec [19]. По данным рис. 1 определялся параметр  $M^2$  пучка [18], который составил 6,6 (для гауссова пучка

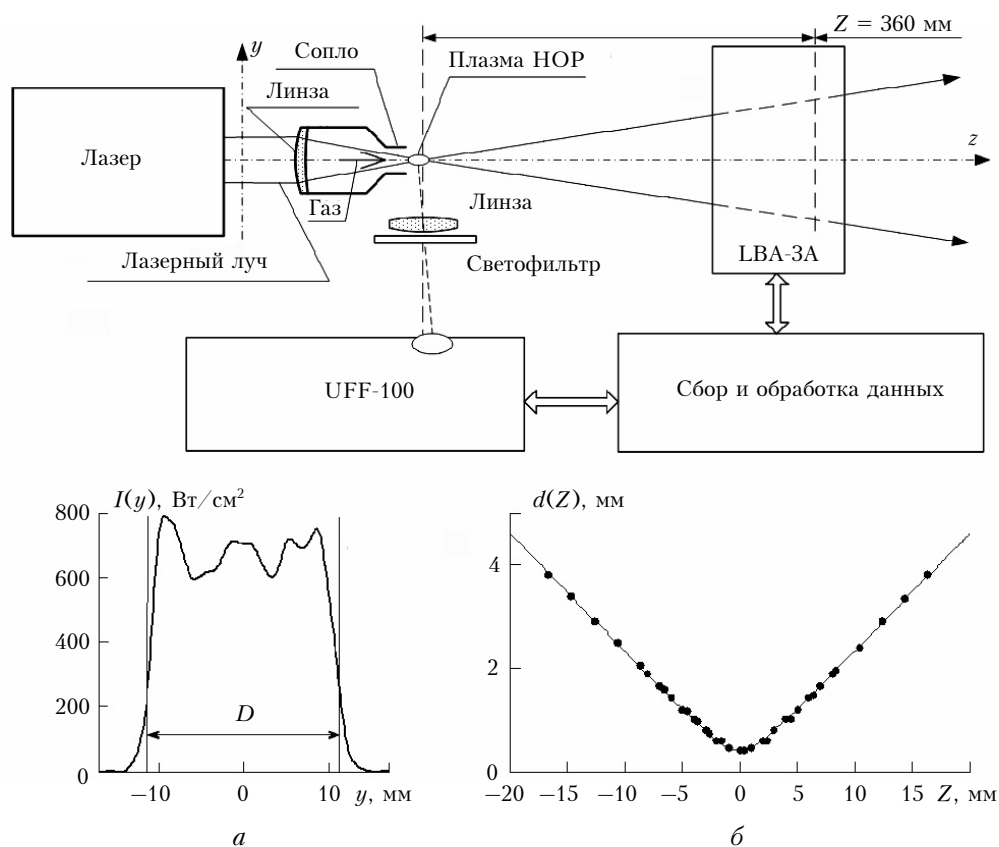


Рис. 1. Экспериментальная установка для регистрации пространственного распределения интенсивности оптического излучения НОР и профиля интенсивности поддерживающего лазерного излучения. Профиль интенсивности лазерного излучения на линзе  $I(y)$  (а). Изменение диаметра луча  $d(Z)$  вдоль оптической оси  $Z$  вблизи фокальной перетяжки (б)

$M^2 = 1$ ). Излучение представляет собой смесь поперечных мод до 3-го порядка, но тем не менее обладает высокой стабильностью и осевой симметрией, и распределение, показанное на рис. 1, *a*, в основном сохраняется вдоль пути распространения луча, в том числе и в перетяжке. В круге диаметром  $D$  (рис. 1, *a*) содержится 94% мощности всего пучка, как и внутри поверхности вращения, задаваемой кривой на рис. 1, *б* и определяющей форму перетяжки луча. На линзе  $D = 22,2$  мм, в перетяжке  $d(0) = 0,4$  мм,  $F/D = 4,4$ .

Для регистрации пространственных распределений излучения плазмы использовался тот же прибор UFF-100 с датчиком оптического излучения (см. рис. 1). Изображение плазмы НОР на входной апертуре прибора с полем  $60 \times 60$  мм строилось кварцевой линзой с увеличением вдвое. Между линзой и прибором устанавливался светофильтр с полосой пропускания шириной 50 нм с центром 530 нм. В этой области спектра излучение НОР представлено в основном непрерывным спектром, что упрощает диагностику.

Для слежения за профилем прошедшего через НОР лазерного луча применялся прибор LBA-3A, работающий по принципу сканирования луча вращающимся стержнем [19]. Особенности работы прибора в расходящемся лазерном луче большой апертуры тщательно учитывались при обработке результатов измерений. Прибор был установлен так, что плоскость сканирования была на расстоянии 360 мм от точки фокуса (см. рис. 1). Сканирование осуществлялось одновременно в вертикальном и горизонтальном направлениях, что позволяло путем интегрирования с достаточной точностью определять также мощность излучения в данном сечении. Системы измерения мощности излучения калибровались по абсолютному водоохлаждаемому калориметру с поглощающим конусом.

## 2. Результаты экспериментов

На рис. 2 представлен результат одновременного измерения распределения интенсивности опти-

ческого излучения плазмы и профиля, прошедшего через плазму лазерного луча. Мощность лазерного излучения на входе составляла  $P = 2,8$  кВт, скорость потока аргона  $V = 4$  м/с. Направление потока газа  $V$  и распространения лазерного излучения  $P$  по отношению к двумерному контурному графику показано стрелками. Замкнутые кривые охватывают поверхность, ограничивающую 94% мощности лазерного излучения. Эти линии контурного графика представляют собой линии равной интегральной излучательной способности плазмы в выделенном диапазоне спектра с шагом 10% от максимума в вертикальном сечении плазмы вдоль оптической оси. График получен из исходного двумерного распределения яркости изображения НОР путем упрощенной процедуры абелизации в приближении гауссовской функции распределения интенсивности излучения по радиусу по методике, изложенной в [20]. Преобразование Абеля сводилось к перенормировке гауссовского распределения, что с некоторыми оговорками может быть проведено в случае распределения, не обладающего точной осевой симметрией, как в нашем случае.

На рис. 2 (слева) внешний контур немного смещен относительно оси пучка. Это результат горизонтального расположения луча и связанной с ним асимметрии потока вследствие гравитационной конвекции. Однако такой процесс существует в основном для внешних областей НОР и мало влияет на внутренние горячие области, определяющие рефракцию. Поскольку излучательная способность плазмы прямо связана с температурой, линии контурного графика представляют собой изотермы.

Прямое определение соответствия температуры в нашем случае затруднительно, поскольку требует более строгого выделения спектральной полосы, чем это было сделано, а также более точного проведения процедуры абелизации. Однако из известной зависимости интенсивности излучения непрерывного спектра от температуры [21] можно оценить весь набор полученных контурных линий-изотерм как лежащий в области от 11 до 15 тыс. К. Одну из изотерм в середине набора при дальнейшем анализе мы принимали

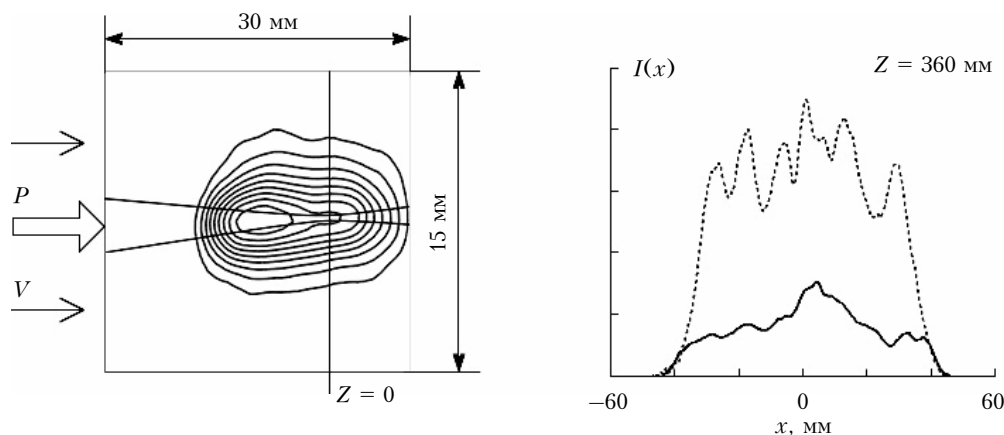


Рис. 2. Распределение излучательной способности плазмы в продольном вертикальном сечении НОР (шаг контуров – 10% от максимума) и соответствующие профили интенсивности лазерного луча  $I(x)$  с НОР (сплошная кривая) и без НОР (пунктир) при  $Z = 360$  мм. Показаны ход лазерного луча в окрестности НОР и положение центра перетяжки  $Z = 0$

за границу плазмы, активной в области поглощения лазерного излучения и рефракции.

На рис. 3 представлена зависимость определенных таким образом координат передней  $Z_f$  и задней  $Z_r$  границ плазмы, а также максимального диаметра плазмы  $d_p$  от скорости потока.

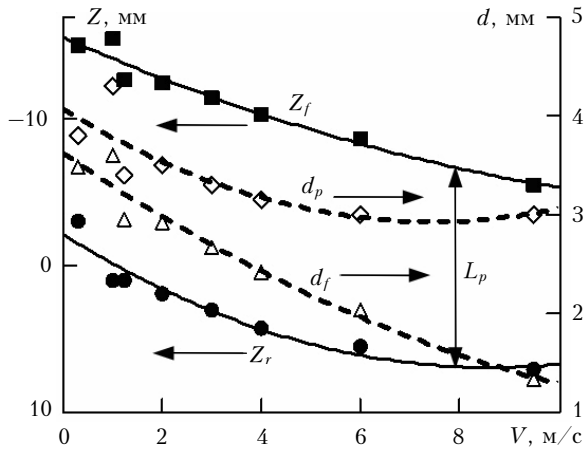


Рис. 3. Зависимость положения передней  $Z_f$  и задней  $Z_r$  границ НОР относительно центра перетяжки  $Z = 0$ , а также диаметра НОР  $d_p$  и диаметра луча на передней границе НОР  $d_f$  от скорости потока  $V$

На графике ось  $Z$  направлена по оси распространения лазерного излучения, точка  $Z = 0$  соответствует положению перетяжки луча в отсутствие плазмы. Видно, что длина плазмы  $L_p = Z_f - Z_r$  составляет 12–14 мм и начинает заметно уменьшаться при скорости потока больше 5 м/с, что сопровождается ростом проходящей мощности от 0,7 до 1 кВт. Оценка коэффициента поглощения из этих данных в среднем составляет  $0,9 \text{ см}^{-1}$ , что подтверждает нашу оценку соответствия температур на рис. 2. Диаметр плазмы  $d_p$  также несколько уменьшается при увеличении скорости потока, оставаясь в пределах от 4 до 3 мм.

Справа на рис. 2 показаны профили интенсивности лазерного излучения с плазмой (сплошная кривая) и без плазмы (пунктир), полученные прибором ЛВА-3А в сечении  $Z = 360$  мм. Видно, что имеет место достаточно сильное поглощение лазерного излучения (через плазму проходит 750 Вт, поглощение составляет более 70% падающей мощности). Рефракция, напротив, слабая, выражается в небольшом уширении распределения с исходных  $D_0 = 80$  мм до  $D = 85$  мм и небольшом перераспределении интенсивности к центру. Оценка среднего угла рефракции, определяемого как  $\theta = (D_0 - D)/(2 \times 360)$ , в этом случае дает  $\theta \sim 10^{-3}$  рад, что не приводит к заметному изменению перетяжки пучка.

Зависимость диаметра пучка в сечении  $Z = 360$  мм и соответствующего среднего угла рефракции от скорости потока представлена на рис. 4. Видно, что рефракция мала при скоростях потока больше 1,5 м/с, а при меньших скоростях резко возрастает до 0,06 рад. При таких углах рефракции перетяжка пучка уширяется более чем вдвое, задняя граница НОР стано-

вится неустойчивой, появляются пульсации плазмы, заметные визуально, с частотой порядка нескольких герц.

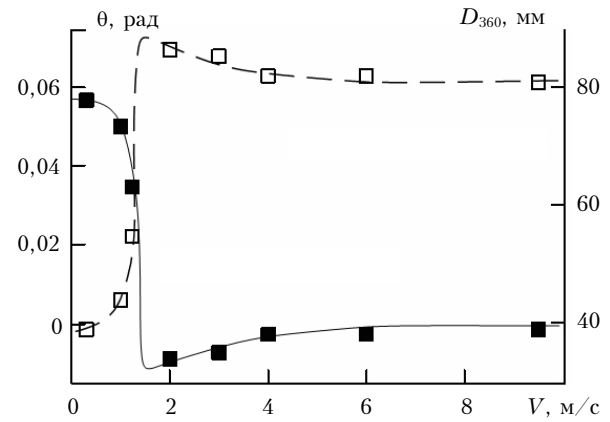


Рис. 4. Зависимость диаметра луча  $D_{360}$  ( $\square$ ), прошедшего через НОР, при  $Z = 360$  мм, и среднего угла рефракции  $\theta$  ( $\blacksquare$ ) от скорости потока  $V$

На рис. 5 показаны изменение вида НОР за период пульсации и соответствующие началу и середине периода пульсации профили интенсивности прошедшего и падающего излучения в сечении  $Z = 360$  мм.

Видно, что состояние с максимальной рефракцией, при котором интенсивность прошедшего излучения на оси в несколько раз превышает интенсивность падающего излучения, приблизительно соответствует минимальной длине плазмы. Последнее наблюдение неожиданно, поскольку рефракция происходит на поперечных к лучу градиентах концентрации свободных электронов, и чем длиннее путь луча в плазме, тем это отклонение должно было бы быть больше (этот вопрос обсуждается в [3, 6, 10–13]). Очевидно, что в нашем случае это не так. Следует отметить, что резкое увеличение интенсивности на оси в сечении  $Z = 360$  мм происходит именно за счет рефракции, поскольку, как нетрудно убедиться, проведя интегрирование по сечению пучка, проходящая мощность даже при минимальной длине плазмы (по данным рис. 3,  $L_p > 10$  мм) не превышает 900 Вт. При скорости потока менее 0,3 м/с плазма гаснет.

Были проведены также эксперименты с НОР в воздухе при атмосферном давлении в условиях естественной конвекции. Скорость конвективного потока, оцененная по данным видеосъемки пульсирующего факела внешних слабосветящихся слоев разряда, составляла 0,3–0,5 м/с и была направлена вверх, перпендикулярно оптической оси. При мощности лазерного излучения 3 кВт в этом случае  $L_p = 5$  мм,  $d_p = 2,3$  мм,  $Z_f = 7$  мм,  $\theta = 5,5 \cdot 10^{-3}$  рад. Мощность, проходящая через НОР, составляла 2 кВт. Сравнение с данными работы [3] показывает, что указанные размеры плазмы соответствуют размерам, на которых концентрация электронов и коэффициент поглощения снижаются вдвое по сравнению с максимальными значениями.

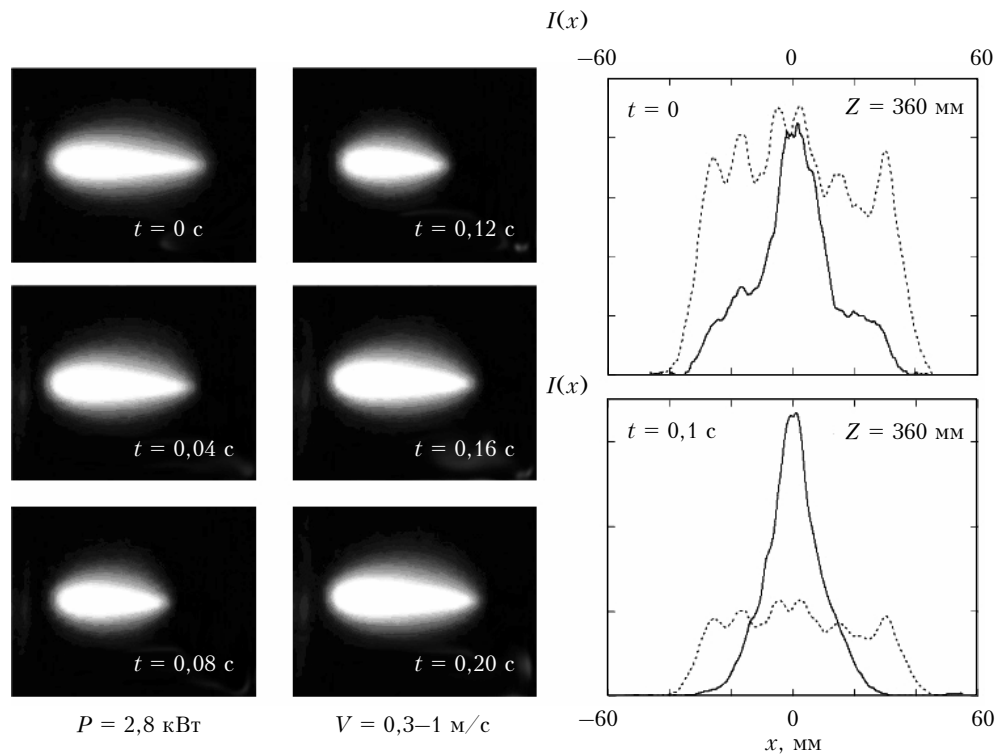


Рис. 5. Период колебаний плазмы НОР (размер кадра  $32 \times 25$  мм) и соответствующие профили интенсивности лазерного излучения  $I(x)$  в сечении  $Z = 360$  мм после фокальной перетяжки в присутствии (сплошная кривая) и в отсутствие плазмы НОР (пунктир)

### Заключение

Результаты по измерению рефракции лазерного излучения в НОР в режиме лазерного плазмотрона показали (см. рис. 4), что в широком диапазоне скоростей газового потока рефракция незначительна и не может оказывать существенного влияния на свойства плазмы НОР. Этот вывод находится в противоречии с результатами ряда работ других авторов [3, 8, 10–13], где отмечалась важная роль рефракции. В связи с этим важно понять, в чем причина малой рефракции излучения при скорости потока  $V > 2$  м/с и резкого роста рефракции при малых скоростях потока.

На рис. 3 показана зависимость диаметра луча, соответствующая передней границе плазмы от скорости потока. Видно, что при больших скоростях потока  $d_f$  меньше диаметра плазмы  $d_p$ . Это значит, что весь луч, проходящий через плазму, находится вблизи оси плазмы, где поперечные градиенты электронной плотности малы, а значит, мала и рефракция, что и наблюдается в эксперименте. При малых скоростях потока плазма выходит в область большего диаметра луча и диаметр плазмы приближается к диаметру луча, что видно из рис. 3. Излучение, по крайней мере на периферии пучка, оказывается в области больших поперечных градиентов электронной концентрации, что вызывает появление сильной рефракции. Взаимодействие подвергающегося рефракции луча и плазмы, вызывающее колебания плазмы и пучка, подобные тем, что показаны на рис. 5, воз-

можно, способствует дальнейшему усилению эффекта рефракции, а также появлению резкой зависимости рефракции от скорости потока, прямо не следующей из приведенных рассуждений (см. рис. 4).

То, что диаметр плазмы в нашем случае больше диаметра лазерного луча, а не соответствует ему (как, например, в [10, 21]), объясняется большой долей теплопроводностных потерь в энергетическом балансе плазмы, характерном для НОР в условиях малого диаметра лазерного луча, низкого давления газа (в нашем случае атмосферного) и наличия дополнительных потерь, связанных с движением газа и турбулентностью потока. При увеличении мощности поддерживающего излучения и уменьшении скорости потока диаметр плазмы возрастает и с ним возрастает доля лучистых потерь, что способствует локализации плазмы в лазерном луче и возрастанию роли рефракции [3, 8, 10–13].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 09-01-00082-а.

1. Райзер Ю.П. О возможности создания светового плазмотрона и необходимой для этого мощности // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. № 3. С. 195–199.
2. Генералов Н.А., Зимаков В.П., Козлов Г.И., Масюков В.А., Райзер Ю.П. Непрерывно горящий оптический разряд // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. № 9. С. 447–449.
3. Fowler M.C., Smith D.C. Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by cw CO<sub>2</sub> laser radiation and their effect on laser beam propagation // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 1. P. 138–150.

4. Герасименко М.В., Козлов Г.И., Кузнецов В.А. Лазерный плазматрон // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 4. С. 709–717.
5. Генералов Н.А., Захаров А.М., Косынкин В.Д., Якимов М.Ю. Устойчивость непрерывного оптического разряда в потоке атмосферного воздуха // Физ. горения и взрыва. 1986. Т. 22. № 2. С. 91–94.
6. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2006. 640 с.
7. Keefer D.R. Laser sustained plasmas // Laser-induced plasmas and applications / L.J. Radziemski, D.A. Cremers, eds. N.Y.: Marcel Dekker, 1989. P. 169–206.
8. Алексеева И.В., Будник А.П., Жеребцов В.А., Зродников А.В., Суржиков С.Т. Непрерывный оптический разряд в термоэмиссионном преобразователе энергии лазерного излучения в электрическую энергию // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 7. С. 90–95.
9. Большаков А.П., Востриков В.Г., Дубровский В.Ю., Конов В.И., Косырев Ф.К., Наумов В.Г., Ральченко В.Г. Лазерный плазматрон для бескамерного осаждения алмазных пленок // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 4. С. 385–389.
10. Глова А.Ф., Лебедев Ф.В., Ярцев В.П. О влиянии рефракции лазерного излучения на плазму оптического разряда // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 12. С. 2471–2473.
11. Козлов Г.И., Кузнецов В.А. Влияние на режим горения оптического разряда рефракции лазерного излучения на плазме разряда // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. Вып. 5. С. 46–50.
12. Райзер Ю.П., Силантьев А.Ю., Суржиков С.Т. Двумерные расчеты непрерывного оптического разряда в потоке атмосферного воздуха (оптического плазматрона) // Теплофиз. высок. температур. 1987. Т. 25. № 3. С. 454–461.
13. Будник А.П., Вакуловский А.С., Попов А.Г., Суржиков С.Т. Математическое моделирование оптического разряда, движущегося по лучу CO<sub>2</sub>-лазера в режиме медленного горения с учетом рефракции излучения // Мат. моделир. 1996. Т. 8. № 5. С. 4–25.
14. Keefer D., Welle R., Peters C. Power absorption in laser sustained argon plasmas // AIAA J. 1986. V. 24. N 10. P. 1663–1669.
15. Chen X., Mazumder J. Emission spectroscopy of cw CO<sub>2</sub> laser-sustained argon plasma: effects of gas flow speed // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 12. P. 5756–5762.
16. Szymanski Z., Peradzynski Z., Kurzyrna J. Free burning laser-sustained plasma in a forced flow // J. Phys. D. 1994. V. 27. N 10. P. 2074–2079.
17. Зимаков В.П., Кедров А.Ю., Кузнецов В.А., Соловьев Н.Г., Шемякин А.Н., Якимов М.Ю. Возбуждение быстропотоковых лазеров методами комбинированного разряда // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 8. С. 669–673.
18. International standard ISO 11146-1:2005. Lasers and laser-related equipment. Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios. Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams. 2005.
19. Graham M.P., Weckman D.C. A comparison of rotating-wire- and rotating-pinhole-type laser beam analyzers when used to measure pulsed Nd:YAG laser beams // Meas. Sci. Technol. 1995. V. 6. N 10. P. 1492–1499.
20. Масюков В.А., Шлехта И. Диагностика свободной аргоновой струи плазматрона по сплошному и интегральному излучению / Препр. ИПМ АН СССР (М.). 1985. № 244. 40 с.
21. Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Масюков В.А. Лучистые потери аргоновой плазмы и излучательная модель непрерывного оптического разряда // Ж. эксперим. и теор. физ. 1974. Т. 66. Вып. 3. С. 954–964.

*V.P. Zimakov, V.A. Kuznetsov, A.Yu. Kedrov, N.G. Solovoyov, A.N. Shemyakin, M.Yu. Yakimov. Laser beam refraction in a continuous optical discharge plasma in a gas flow under atmospheric pressure.*

The results of the experimental investigation of the sustaining laser beam refraction in a continuous optical discharge (COD) plasma, stabilized in a focused ( $f/4.4$ ) laser beam and coaxial gas flow, are presented for the first time. Spatial distributions of the intensity of optical radiation, emitted by the plasma of COD, and the intensity profiles of sustaining laser beam ( $M^2 = 6.6$ ), transmitted through the plasma, were detected simultaneously. A considerable refraction of the sustaining laser beam up to 0.06 radians has been observed at low gas flow velocities when the front boundary of the plasma achieves the beam cross section with diameter close to the transverse diameter of the plasma. The state of the COD plasma was unstable in this case, following oscillations and extinction after the gas flow velocity had decreased. In main flow velocity range from 1.5 to 10 m/s and higher the plasma was stable and laser beam refraction was of the order of milliradians and could not affect plasma parameters.