

## Прохождение интенсивного лазерного излучения сквозь диффузионное пламя горячей нефти

С.В.Гвоздев, А.Ф.Глова, В.Ю.Дубровский, С.Т.Дурманов,  
А.Г.Красюков, А.Ю.Лысиков, Г.В.Смирнов, В.М.Плешков

*Приведены результаты измерений показателя поглощения излучения непрерывного иттербиевого волоконного одномодового лазера мощностью до 1.5 кВт диффузионным пламенем нефти, горячей в атмосферном воздухе при нормальном давлении на свободной поверхности. Для постоянных длины (30 мм) и ширины (30 мм) пламени при расстоянии от оси лазерного пучка до поверхности нефти 10 мм получена зависимость среднего по длине пламени показателя поглощения от средней интенсивности излучения на входе в пламя, изменяющейся в пределах  $4.5 \times 10^3 - 1.2 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Дается качественное объяснение немономонному характеру изменения показателя поглощения.*

**Ключевые слова:** лазер, пламя, интенсивность излучения, средний показатель поглощения.

### 1. Введение

Разбор металлоконструкций, загромаждающих устье открыто фонтанирующей нефтяной или газовой скважины, является актуальной задачей, т.к. позволяет уменьшать потери сырья и способствует нормализации экологической обстановки в зоне аварии. Современным и безопасным способом ведения аварийно-восстановительных работ в данных условиях является дистанционная резка конструкций лазерным излучением [1]. Эффективность этого способа успешно демонстрируется с 2011 г. при устранении последствий реальных аварий на газовых скважинах мобильным лазерным технологическим комплексом МЛТК-20 [2]. Основой комплекса служат три мощных иттербиевых волоконных лазера непрерывного действия. Успех в применении для указанных целей лазерного излучения во многом зависит от того, насколько эффективно и без потерь осуществляется его транспортировка к месту воздействия. Очевидно, что в случае транспортировки пучка излучения сквозь пламя происходит его ослабление, причем степень ослабления зависит от состава сгораемых углеводородов и длины зоны горения [3]. Условия прохождения излучения сквозь пламя горящего природного газа даже при наличии примесей песка и воды являются относительно благоприятными [2]. Однако данные условия могут измениться в случае прохождения излучения сквозь другое пламя, например пламя газового конденсата или пламя горячей нефти.

С.В.Гвоздев, В.Ю.Дубровский, С.Т.Дурманов, А.Г.Красюков, А.Ю.Лысиков, Г.В.Смирнов, В.М.Плешков. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, влад.12; e-mail: gsv@triniti.ru, lysikov@triniti.ru  
А.Ф.Глова. АО «ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, 142190 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, влад.12; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31; e-mail: afglova@triniti.ru

Поступила в редакцию 9 апреля 2014 г., после доработки – 16 сентября 2014 г.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование ослабления излучения мощного иттербиевого волоконного лазера непрерывного действия при его распространении сквозь диффузионное пламя горячей нефти в зависимости от интенсивности излучения.

### 2. Экспериментальная установка и методики измерений

Пламя инициировалось в металлической кювете размером 50 × 50 мм с глубиной 5 мм при поджиге в нормальных условиях паров нефти, заполняющей кювету. Стабилизация пламени достигалась за счет боковых стенок кюветы и расположенной над ней вентиляционной вытяжки. В качестве источника излучения использовался непрерывный одномодовый иттербиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 1.07 мкм и максимальной мощностью 1.5 кВт. Лазерный пучок был ориентирован вдоль одной из сторон кюветы, центрировался по отношению к перпендикулярной стороне и распространялся в желтой части пламени при расстоянии от оси пучка до поверхности нефти  $h = 10$  мм. Длина пламени вдоль трассы пучка  $l \approx 30$  мм. Диаметр перетяжки пучка  $d_0$ , локализованный в центральной части пламени по направлению распространения пучка, составляет 1 или 0.4 мм (в зависимости от фокусного расстояния линзы). При длинах каустики для этих двух значений  $d_0$ , равных 140 и 22 см соответственно, диаметр пучка на длине  $l$  мало отличается от  $d_0$ . Что касается рефракционного уширения пучка или искривления его оси относительно положения оси при распространении в отсутствие пламени, то этими эффектами можно пренебречь, о чем свидетельствуют наблюдения отпечатка пучка на удаленном экране. Интенсивность излучения на входе в пламя  $I_{in}$  менялась за счет изменения мощности и  $d_0$ , и пределы изменения ее усредненных по радиальной координате значений составляли  $4.5 \times 10^3 - 1.7 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при  $d_0 = 1$  мм и  $5.6 \times 10^5 - 1.2 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при  $d_0 = 0.4$  мм. Отметим, что выбор указанного ранее пространственного положения пучка в пламени проводился на основе предварительных измерений, выполненных при разных  $h$ . Согласно этим измерениям при типичной

для дистанционной резки металлов интенсивности  $I_{in} \sim 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> наиболее неблагоприятные условия распространения излучения в максимально поглощающем пламени соответствуют  $h \approx 10$  мм; при этом величина показателя поглощения почти не зависит от перемещения пучка в горизонтальном направлении в пределах 15 мм.

Мощность излучения на выходе из пламени можно представить в виде  $P_{out} = P_{in} \exp[-(\alpha + \mu)l]$ , где  $\alpha, \mu$  – средние по длине  $l$  показатели поглощения и рассеяния излучения соответственно, а  $P_{in}$  – мощность на входе в пламя. Основываясь на результатах измерений доли мощности излучения, рассеянного сходным по внешнему виду пламенем авиационного керосина [3], полагаем  $\mu \ll \alpha$  и в качестве критерия ослабления используем следующее выражение для среднего показателя поглощения, содержащее все измеряемые величины:  $\alpha = (-1/l) \ln(P_{out}/P_{in})$ .

Распространение излучения сквозь пламя сопровождается свечением трассы пучка, причем интенсивность свечения при увеличении интенсивности падающего излучения также увеличивается. Эта корреляция может быть связана с изменением температуры содержащихся в пламени твердых частиц при их нагреве лазерным излучением. В настоящей работе проводились измерения температуры выделенного диафрагмой центрального участка трассы пучка.

### 3. Результаты измерений и обсуждение

Измерения температуры пламени при распространении в нем лазерного излучения показали, что в диапазоне интенсивностей  $3.5 \times 10^4 - 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> она линейно растет от 2000 до 3000 К, при дальнейшем увеличении интенсивности рост температуры замедляется, и при максимальном в данных экспериментах значении  $I_{in} = 1.2 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> она становится равной 3400 К. Отметим, что в экспериментах работы [4] при облучении в вакууме углеродных частиц излучением CO<sub>2</sub>-лазера с интенсивностью  $2 - 3 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> температура частиц достигала 4500 К.

Результаты измерений  $\alpha$  в зависимости от  $I_{in}$  представлены на рис.1. Погрешность измерений составляет 20%. Зависимость имеет следующие особенности. Во-первых, при изменении интенсивности падающего излучения в пределах  $4.5 \times 10^3 - 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> показатель поглощения проходит через максимум, в котором достигает значений  $0.12 - 0.13$  см<sup>-1</sup> при  $I_{in} \approx 10^4 - 4 \times 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>, и,

во-вторых, при увеличении интенсивности от  $10^5$  до  $1.2 \times 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> его величина практически стабилизируется на очень низком уровне, составляющем  $5 \times 10^{-3} - 10^{-2}$  см<sup>-1</sup>. Можно сказать, что при данных интенсивностях происходит просветление канала в пламени, по которому проходит излучение.

Для качественной интерпретации приведенных на рис.1 данных ограничимся рассмотрением влияния на прохождение излучения твердых частиц углерода, всегда присутствующих в углеводородном пламени в виде сажи [5]. На участке АВ при увеличении интенсивности излучения температура частиц также увеличивается, потери мощности лазерного излучения на нагрев возрастают и это приводит к росту показателя поглощения. Из-за относительно низкой температуры пламени испарение частиц в поле лазерного излучения не происходит. Однако при увеличении температуры резко возрастает скорость сгорания частиц. Поэтому участок ВС можно рассматривать как область динамического равновесия между сгоранием частиц и их поступлением в зону взаимодействия из-за конвекции. В этих условиях, казалось бы, показатель поглощения не должен зависеть от дальнейшего увеличения интенсивности и должен оставаться на уровне, соответствующем участку ВС. Однако эксперимент показывает, что при увеличении интенсивности на участке CD происходит сильное, более чем на порядок по сравнению с участком ВС, уменьшение показателя поглощения. Причиной малости  $\alpha$  и отсутствия зависимости  $\alpha$  от  $I_{in}$  в области FG может быть следующее. В этой области интенсивность излучения настолько высока, что поглощающие излучение частицы сгорают уже на периферии пучка. В результате основная, центральная, часть пучка оказывается свободной от частиц и распространяется в пламени с малыми потерями мощности вследствие слабого поглощения лазерного излучения с длиной волны 1.07 мкм газообразными продуктами горения. Что касается участка CDEF, то он является переходным между областями сильного и слабого поглощения и здесь возможны отклонения от монотонного уменьшения показателя поглощения (точка E), но это не вносит кардинальных изменений в общий характер зависимости  $\alpha(I_{in})$ .

Аналогичные измерения были выполнены с использованием излучения многомодового иттербиевого волоконного лазера. Измерения проводились для пламени нефти и авиационного керосина ТС-1 при том же значении  $h = 10$  мм и максимальной интенсивности  $I_{in}$ , не превышающей  $3.5 \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при  $d_0 = 0.9$  мм. Зависимость  $\alpha(I_{in})$  имеет те же особенности, что и приведенная на рис.1, а абсолютные значения показателя поглощения при фиксированных значениях  $I_{in}$  для пламени нефти практически не различались для одномодового и многомодового лазеров. Это может свидетельствовать о том, что основную роль в просветлении канала прохождения излучения играют не размер пятна фокусировки  $d_0$  и качество излучения, а его интенсивность.

Необходимо подчеркнуть, что приведенная интерпретация зависимости  $\alpha(I_{in})$  имеет качественный характер и не учитывает изменение размера частиц при горении, а также газодинамические потоки в пламени, связанные с разогревом среды в пучке. Для более строгого и количественного объяснения полученных результатов необходимы дальнейшие экспериментальные исследования.

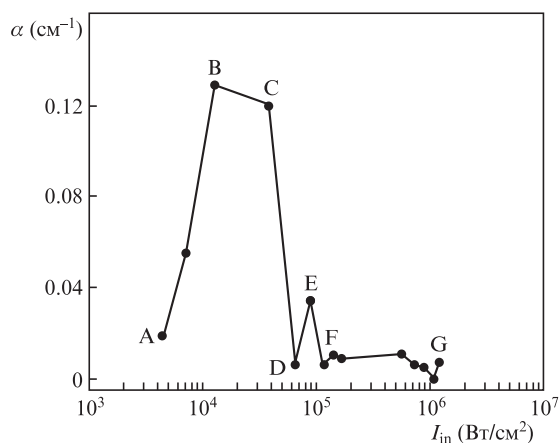


Рис.1. Зависимость  $\alpha(I_{in})$  для пламени нефти при его длине  $l \approx 30$  мм и расстоянии от оси пучка до поверхности нефти 10 мм.

#### 4. Заключение

Приведенные в настоящей работе результаты измерений показали, что средний показатель поглощения излучения непрерывного иттербиевого волоконного лазера диффузионным пламенем нефти изменяется немонотонно в зависимости от интенсивности падающего излучения и при интенсивности более  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> стабилизируется на низком уровне, составляющем  $5 \times 10^{-3} - 10^{-2}$  см<sup>-1</sup>. Полученные результаты необходимо учитывать при разработке и применении мобильных лазерных технологических комплексов нового поколения, обеспечивающих интенсивность излучения в зоне воздействия  $\sim 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> и предназначенных для дистанционной резки металличе-

ских конструкций аварийно фонтанирующих газоконденсатных и нефтяных скважин.

1. Блохин О.А., Востриков В.Г., Гаврилюк В.Д. и др. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, № 5, 52 (2001).
2. Durmanov S., Krasukov A., Smirnov G., Cherkovets V. *Tech. Progr. 6-th Int. Symp. on High-Power Fiber Lasers and their Applications* (St.Petersburg, Russia, 2012).
3. Гвоздев С.В., Глова А.Ф., Дубровский В.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **42**, 350 (2012).
4. Андрухова Т.В., Букатый В.И. *Известия Алтайского государственного университета*, № 1 (23), 99 (2002).
5. Ли Ч.Б., Ли В., О К.Ч., Шин Х.Д., Ён Д.-К. *Физика горения и взрыва*, **42**, 74 (2006).