

На правах рукописи

Гвоздев Сергей Викторович

**ПРОХОЖДЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ
ПЛАМЯ УГЛЕВОДОРОДОВ И ДИСТАНЦИОННАЯ
ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА МАТЕРИАЛОВ**

Специальность: 01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2020

Работа выполнена в Акционерном обществе «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)

Научный руководитель:

Глова Александр Фёдорович

доктор физико-математических наук, профессор,
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» начальник лаборатории лазерных технологий.

Официальные оппоненты:

Козловский Владимир Иванович

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Физический институт им. Н.П. Лебедева Российской академии наук,
Троицкое обособленное подразделение, включающее «Троицкий технопарк
ФИАН» (ТОП ФИАН), лаборатория лазеров с катодно-лучевой накачкой,
главный научный сотрудник

Федосеев Анатолий Иванович

доктор физико-математических наук, доцент,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, профессор

Лебедев Фёдор Владимирович

доктор физико-математических наук, профессор,
Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Научно-образовательный
центр «Лазеры, оптика, информатика», директор

Защита состоится « 22 » декабря 2020 г. в 15 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета «МИФИ.01.04» НИЯУ МИФИ по адресу:
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте
<http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2020 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
МИФИ.01.04, к.ф.-м.н.

А.А. Степаненко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и ее состояние

Разбор металлоконструкций, загромаждающих устье открыто фонтанирующей газовой скважины, является актуальной задачей, так как позволяет сократить потери сырья и способствует нормализации экологической обстановки в зоне аварии. Современным и безопасным способом ведения аварийно-восстановительных работ в этих условиях является дистанционная резка металлоконструкций лазерным излучением [1]. Термин «дистанционная резка» означает проведение резки на больших (десятки метров) расстояниях до объекта взаимодействия и в отсутствие вспомогательной газовой струи для удаления расплава. Эффективность этого способа успешно демонстрируется с июля 2011 года при ликвидации последствий реальных аварий на газовых скважинах с помощью мобильного лазерного технологического комплекса МЛТК-20 [2], созданного на базе трёх непрерывных волоконных лазеров. Успех в применении лазерного излучения при решении данной задачи зависит от того, насколько эффективно и без потерь осуществляется его транспортировка к объекту взаимодействия. Очевидно, что в случае транспортировки луча сквозь пламя происходит ослабление излучения. Для снижения энергетических потерь излучения, проходящего сквозь пламя и повышения эффективности дистанционной резки, необходимы всесторонние исследования, направленные на определение оптимальных параметров лазерного излучения. Этому вопросу до настоящего времени было уделено недостаточно внимания, и он слабо отражён в литературе.

Диссертация посвящена изучению прохождения лазерного излучения сквозь пламя горящих углеводородов и дистанционной резке металлов и строительного бетона лазерным излучением при различной интенсивности. Данная работа направлена на решение важных практических задач: снижение энергетических потерь при распространении лазерного излучения сквозь углеводородное пламя и повышение эффективности дистанционной резки металлов и строительного бе-

тона лазерным излучением не только на аварийных газовых, но и на нефтяных скважинах.

Цель работы

Целью данной работы является:

- экспериментальное исследование поглощения и рассеяния лазерного излучения с длиной волны ≈ 1 мкм диффузным пламенем различных углеводородов, горящих в атмосферном воздухе на свободной поверхности;
- экспериментальное определение возможности и эффективности дистанционной резки металлических и бетонных конструкций лазерным излучением повышенной $\geq 10^5$ Вт/см² интенсивности.

Задачи работы

- измерение доли мощности излучения, рассеянного пламенем керосина, при его распространении в жёлтой части пламени;
- определение среднего коэффициента поглощения излучения в зависимости от состава сгораемых углеводородов, протяжённости зоны пламени и интенсивности излучения;
- экспериментальная демонстрация возможности и высокой эффективности дистанционной резки металла и бетона излучением повышенной интенсивности;
- дистанционная лазерная резка металла и бетона с одинаковыми параметрами излучения.

Научная новизна работы

При проведении данной работы впервые получены следующие результаты:

- показано, что доля рассеянного излучения при его распространении в жёлтой части пламени керосина невелика и составляет тысячные доли;
- установлено, что коэффициент поглощения излучения пламенем керосина зависит от режима работы лазера, и при одинаковой импульсной и непрерывной интенсивности излучения $\sim 10^3$ Вт/см² коэффициент поглощения в импульсно-периодическом (ИП) режиме меньше, чем в непрерывном режиме;

- экспериментально установлено образование канала «просветления» среды в пламени керосина и нефти при достижении значения интенсивности падающего излучения $\geq 10^5$ Вт/см² независимо от качества излучения и диаметра пучка;
- показано, что увеличение интенсивности непрерывного излучения $\geq 10^5$ Вт/см² приводит к повышению эффективности дистанционной резки по сравнению с эффективностью, получаемой при интенсивности $\leq 10^4$ Вт/см².

Практическая значимость работы

Практическая значимость данной работы состоит в следующем:

- небольшая доля рассеянного пламенем излучения не представляет опасности для персонала при проведении восстановительных работ в устье аварийного нефтегазового месторождения с помощью лазерного излучения;
- обнаруженный эффект просветления канала распространения излучения в пламени нефти при повышенной интенсивности позволяет транспортировать лазерный луч с минимальными энергетическими потерями и одновременно повысить эффективность дистанционной резки. Совместное влияние этих двух факторов позволяет уменьшить мощность излучения лазерного комплекса и, следовательно, снизить его стоимость.

Основные положения, выносимые на защиту

- результаты измерений доли мощности рассеянного лазерного излучения с длиной волны 1.06 мкм при его распространении в жёлтой части диффузного пламени керосина;
- результаты измерений среднего коэффициента поглощения излучения ИП Nd:YAG-лазера и непрерывного Yb волоконного лазера диффузным пламенем керосина, этилового спирта и смеси керосина с этиловым спиртом при интенсивности излучения $10^3 \div 10^4$ Вт/см²;
- экспериментально обнаруженный эффект образования канала просветления среды в пламени керосина и нефти при интенсивности непрерывного излучения Yb волоконного лазера $\geq 10^5$ Вт/см²;

- высокая эффективность дистанционной обработки металлов и строительного бетона (сверление, резка) непрерывным лазерным излучением с интенсивностью $\geq 10^5$ Вт/см².

Личный вклад соискателя

Автор принимал непосредственное участие в постановке, подготовке и проведении экспериментов, описанных в диссертационной работе. Результаты впервые измеренной доли рассеянного пламенем керосина лазерного излучения получены совместно с соавторами опубликованных работ. Проведенные впервые измерения среднего коэффициента поглощения излучения непрерывного волоконного Yb лазера диффузионным пламенем нефти и керосина в зависимости от интенсивности излучения и обнаруженный эффект просветления канала распространения излучения в пламени при интенсивности излучения $\geq 10^5$ Вт/см² являются оригинальными результатами, полученными лично автором. Результаты по времени сверления и эффективности резки стальных пластин при интенсивностях излучения 10^4 и 10^6 Вт/см² получены совместно с соавторами опубликованных работ. Автор является непосредственным разработчиком программы экспериментов по дистанционной лазерной резке толстостенного металла и строительного бетона. Постановка задач исследований, определение методов их решения и интерпретация результатов выполнены под руководством научного руководителя работы.

Достоверность полученных результатов и выводов

Стабильность работы установки и измерительного оборудования, повторяемость результатов в экспериментах по исследованию ослабления лазерного излучения при его распространении сквозь пламя, свидетельствует о достоверности полученных значений доли рассеянного излучения и коэффициента поглощения, включая устойчивость эффекта образования канала просветления среды при повышенной интенсивности.

Во всех проведенных экспериментах по дистанционной резке и сверлению стали толщиной до 10 мм увеличение интенсивности излучения от $10^3 \div 10^4$ Вт/см²

до $10^5 \div 10^6$ Вт/см² приводит к увеличению эффективности резки и к уменьшению времени сверления.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в тезисах и трудах и представлены на российских и международных конференциях:

1. The XIX International Symposium on high Power Laser System and Application, Istanbul, 10-14 September 2012.
2. XV Международная научная конференция «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», 1-5 октября 2012 г., Россия, г. Звенигород.
3. International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL*2013), Sudak, Ukraine, 9-13 September 2013.
4. The 21th annual International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT'13), Budva, Montenegro, 16-20 September 2013.
5. The 20th International Symposium on High Power Laser System and Application, 25-29 August 2014, Chengdu, China.
6. XI конференция «Лазеры и лазерно-информационные технологии: Фундаментальные проблемы и применения» (ILLA 2014), 29 сентября – 3 октября 2014 г., Россия, г. Шатура.
7. The International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL*2016), Odessa, Ukraine, 12-15 September 2016.
8. The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics/ International Conference on Lasers, Applications and Technologies (ICONO/LAT 2016), Minsk, Belarus, 26-30 September, 2016.
9. III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017», 24-27 января 2017 г., Россия, НИЯУ МИФИ.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, в том числе 7 – в журналах, рекомендованных ВАК, 3 из которых включены в базы цитирования Scopus и Web of Science и 3 – в базу данных Scopus, 9 – в журналах и сборниках трудов конференций, в том числе на английском языке.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 91 наименование. Общий объём работы составляет 102 страницы, в том числе 11 таблиц и 45 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, изложены цели и задачи диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, отражён личный вклад соискателя и апробация работы, представлена структура диссертации.

Первая глава представляет собой литературный обзор, описывающий современное состояние как российских, так и зарубежных исследований по взаимодействию лазерного излучения с пламенем различных углеводородов и исследований механизма дистанционной лазерной резки металлов.

Одной из наиболее остро стоящих проблем в газовой добывающей отрасли и особенно газовой разведке являются аварии с возникновением пожара в устье газового месторождения. В результате мощного выброса природного газа оборудование скважины зачастую получает сильные повреждения, нарушается герметизация сочленений газового превентора. Потоки горящего природного газа с выходным давлением от 100 атм и выше начинают с большой скоростью истекать из открытых мест повреждений в разные стороны. Образующийся в результате протяжённый источник тепла не позволяет приблизиться к устью ближе, чем на 20 м с подветренной стороны без специальной защиты. Первой наиболее сложной и трудоёмкой задачей в данных условиях является разбор образовавшихся завалов арматуры, общая масса которых может составлять несколько сотен тонн, открыть доступ к повреждённому газовому превентору. На следующем этапе необходимо дистанционно отделить повреждённую часть превентора для получения вертикально направленного газового факела, так называемого «фонтана». Все выше перечисленные обстоятельства серьёзно осложняют работу аварийно-спасательной бригады. До недавнего времени для решения данной проблемы использовался, в том числе, и такой радикальный способ как применение армейской артиллерии. Однако данный метод является не только длительным по времени и затратным, но

и серьёзно повреждает само устье газового месторождения. Необходим был новый, принципиально иной подход к решению данной проблемы.

В начале 90-х годов прошлого века в ГНЦ РФ ТРИНИТИ был предложен принципиально новый метод решения этой задачи, основанный на дистанционной разделительной лазерной резке металлоконструкций. Проведённые научные исследования и опытно-конструкторские работы позволили в кооперации с рядом российских предприятий создать мобильный лазерный технологический комплекс МЛТК-50 [1] средней мощностью излучения 50 кВт на основе электроионизационного CO_2 - лазера импульсно-периодического действия с открытым газовым циклом, работающий на атмосферном воздухе с добавлением 5% CO_2 . Этот комплекс стал фактически первой машиной, предназначенной для решения подобных задач. Однако, не смотря на то, что комплекс соответствовал заявленным требованиям по выходным параметрам, его массовые и габаритные данные, а также сложность в эксплуатации и обслуживании оставались слабым местом машины.

В первой половине 2000-х годов мощный импульс развития получили волоконные лазеры, разработанные на базе кварцевых волокон, активированных редкоземельными металлами. Созданные в ООО «НТО «ИРЭ-Полюс» (г. Фрязино Московской области) мощные волоконные лазерные источники имели уникальные массогабаритные и эксплуатационные характеристики [3]. Новые лазеры с оптоволоконной системой доставки лазерной энергии хорошо вписывались в разработанную концепцию МЛТК, что послужило стимулом для создания в конце 2010 года в ГНЦ РФ ТРИНИТИ в кооперации с рядом российских предприятий лазерного технологического комплекса следующего поколения на базе трёх волоконных Yb непрерывных лазеров мощностью 8 кВт каждый. Фокусирующая система комплекса обеспечивала рабочую интенсивность излучения в месте сведения трёх лазерных пучков в один $\sim 10^4$ Вт/см². На сегодняшний день на счету новой машины, получившей название МЛТК-20 [2], четыре успешные ликвидации последствий аварий на разных газовых месторождениях.



Рис.1. Срезанный лазерным лучом фрагмент газовой арматуры. Северо-Губкинское месторождение. Январь 2015 г. Время резки ~ 20 мин.

симось от направления ветра, требующее частой смены позиции комплекса и тем самым существенно осложняющее работу в зоне аварии, послужило стимулом для начала исследований в этом направлении.

Основным вопросом при сверлении и резке материалов лазерным излучением является вопрос удаления образовавшегося расплава из зоны взаимодействия. Как правило, расплав удаляется с помощью газовой струи, подаваемой через специальное сопло, расположенное в непосредственной близости от расплавленной области. Однако при решении ряда практических задач возникает необходимость резки металлических конструкций, доступ к которым затруднён, либо вовсе невозможен и, следовательно, невозможной становится и подача газовой струи.

Очистка устья скважины от повреждённого оборудования при аварийно-восстановительных работах на открыто фонтанирующих газовых месторождениях относится к таким задачам [4]. В этих условиях удаление расплава возможно за счёт вытекания под действием силы тяжести, под действием термокапиллярных сил, а также за счёт давления отдачи паров.

Для критического диаметра расплава $D_{кр}$ в зависимости от толщины пластины H , при котором происходит вытекание расплава под действием силы тяжести, в работе [5] получены следующие выражения:

Тем не менее, практика реального применения комплекса вскрыла серьёзную проблему. Наличие в природном газе таких примесей как нефть, газовый конденсат приводит к высоким энергетическим потерям излучения с указанной рабочей интенсивностью при его взаимодействии с пламенем. Данное обстоятельство, ставящее операторов комплекса в зави-

$$D_{кр}^{тонк} = 4.36\sqrt[3]{R_{кан}^2 H} \quad \text{для } H < 0.75 R_{кан} \text{ (тонкие пластины)}, \quad (1)$$

$$D_{кр}^{толст} = 3.96 R_{кан} \quad \text{для } H > 0.75 R_{кан} \text{ (толстые пластины)},$$

где $R_{кан} = \sqrt{\sigma/\rho g}$ – капиллярный радиус, σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава, ρ – плотность, g – ускорение свободного падения.

При создании отверстия в очень тонкой пластине ($H \ll 0.75 R_{кан}$) основную роль может играть не сила тяжести, а термокапиллярная конвекция. Критический размер расплавленной зоны $D_{кр}$ в этом случае описывается выражением [5]:

$$D_{кр} = 24.6 r_0 \sqrt{H/R_{конв}}, \quad (2)$$

где r_0 – радиус лазерного пучка и по аналогии с капиллярным радиусом $R_{кан}$ введён характерный размер $R_{конв} = \frac{(\partial\sigma/\partial T) P_{погл}}{\nu C \sigma}$, где $P_{погл}$ – мощность, поглощаемая

образцом, ν – кинематическая вязкость расплава, C – теплоёмкость единицы объёма расплава.

Необходимо отметить, что зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры может быть разной. Вышеописанный механизм имеет место при условии $(\partial\sigma/\partial T) < 0$, т.е. когда с ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается, и расплав перемещается из центральной области зоны взаимодействия с более высокой температурой на периферию с меньшей температурой. Однако ряд материалов обладает обратным свойством: $(\partial\sigma/\partial T) > 0$ и термокапиллярная конвекция в этом случае вклада в удаление расплава не вносит. Подобная ситуация возможна также для материалов с $(\partial\sigma/\partial T) < 0$, если на их поверхность наносится присадка с $(\partial\sigma/\partial T) > 0$. Подробные исследования в этом направлении приведены в работе [6].

Необходимо отметить, что зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры может быть разной. Вышеописанный механизм имеет место при условии $(\partial\sigma/\partial T) < 0$, т.е. когда с ростом температуры поверхностное натяжение уменьшается, и расплав перемещается из центральной области зоны взаимодействия с более высокой температурой на периферию с меньшей температурой. Однако ряд материалов обладает обратным свойством: $(\partial\sigma/\partial T) > 0$ и термокапиллярная конвекция в этом случае вклада в удаление расплава не вносит. Подобная ситуация возможна также для материалов с $(\partial\sigma/\partial T) < 0$, если на их поверхность наносится присадка с $(\partial\sigma/\partial T) > 0$. Подробные исследования в этом направлении приведены в работе [6].

Известен и достаточно подробно описан в работах [7-11] метод двухлучевого лазерного воздействия на металл, когда излучение мощного непрерывного лазера с небольшой интенсивностью $\sim 10^4$ Вт/см² плавит металл, а излучение относительно маломощного импульсно-периодического лазера с интенсивностью в импульсе $\sim 10^6 \div 10^7$ Вт/см² приводит к удалению расплава под действием дав-

ления отдачи паров. Однако, применение этого метода в условиях реальной аварии сопряжено с техническими трудностями точного совмещения остросфокусированного луча ИП-лазера с лучом непрерывного лазера на объекте взаимодействия, удалённом на несколько десятков метров, и в условиях не всегда хорошей видимости.

Взаимодействию лазерного излучения непосредственно с пламенем посвящено сравнительно небольшое число работ [12-14]. Их основным содержанием является возможность управления процессом горения с помощью лазерного излучения. Ряд работ посвящён взаимодействию лазерного излучения с газопылевой средой при различных давлениях окружающего газа [15-17].

Таким образом, исследованиям по прохождению лазерного излучения сквозь углеводородное пламя в литературе уделено недостаточно внимания. Между тем, данный вопрос является одним из основных при решении задач по ликвидации аварий на нефтегазовых месторождениях и потому представляет важное практическое значение.

Во второй главе приводится описание экспериментальной установки и результаты измерений рассеянной пламенем мощности лазерного излучения и коэффициента поглощения излучения с длиной волны ≈ 1 мкм в пламени в зависимости от параметров пламени и излучения. Поглощение и рассеяние являются основными каналами ослабления лазерного излучения при его распространении сквозь пламя. Исследованиям поглощения излучения в пламени обогащённого кислородом топлива посвящены работы [18, 19].

Для определения доли рассеянной мощности использовался импульсно-периодический (ИП) Nd:YAG лазер с длиной волны излучения 1.06 мкм, близкой к длине волны непрерывного волоконного Yb лазера (1.07 мкм). Импульсная интенсивность на входе в пламя составляет $5 \cdot 10^3$ Вт/см² и примерно соответствует непрерывной интенсивности при дистанционной резке металлов излучением комплекса МЛТК-20. В качестве горючего в данных экспериментах применялся керосин, т. к. он является наиболее сажеобразующим, при горении, компонентом газового конденсата.

Схема установки приведена на рис.2. Излучение лазера (длительность импульса на полувывоте $\tau = 130$ мкс, частота повторения импульсов $f = 1 \div 50$ Гц, максимальная энергия в импульсе 0.5 Дж) *1* с помощью коллиматора, состоящего из линз *2* и *3*, формируется в параллельный на длине пламени *4* лазерный пучок. Диаметр пучка d_0 при настройке коллиматора может изменяться. Измеритель мощности *7* служит для измерения мощности излучения в отсутствие пламени и с пламенем, что позволяет определять величину ослабления мощности при распространении излучения сквозь пламя. Рассеянная мощность измеряется калиброванным фотодиодом *14*, установленным вместе с оптическими элементами *8*÷*13* на оптической скамье, имеющей ось вращения *O*. Элементы *9*, *10*, а также пластины *5*, *6* используются при калибровке фотодиода и при измерениях выводятся из схемы. Диффрагма *8* диаметром 4 мм применяется для выделения излучения, рассеянного малым участком пламени. Поворот скамьи вокруг оси *O* позволяет измерять рассеянную малым участком мощность в зависимости от угла рассеяния, а перемещение кюветы с пламенем вдоль оси пучка при фиксированном угле – измерять мощность, рассеянную разными участками. Измерения проводились со

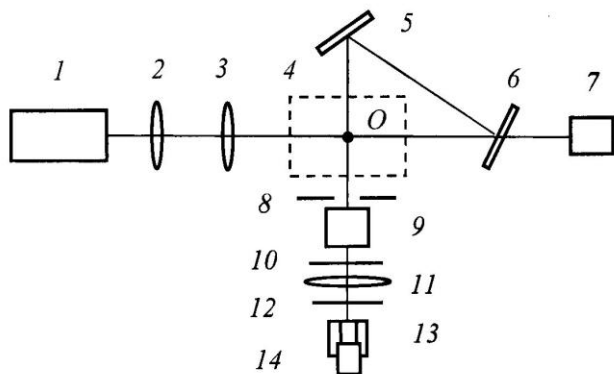


Рис.2. Схема установки. *1* – ИП Nd:YAG лазер; *2*, *3* – линзы коллиматора; *4* – область пламени; *5*, *6* – ослабляющие пластины; *7*, *9* – приемники излучения; *8* – диффрагма; *10* – набор нейтральных светофильтров; *11* – формирующая линза; *12* – ИК светофильтр; *13* – бленда; *14* – фотодиод.

спокойным пламенем. Его стабилизация достигалась за счет боковых защитных стенок с окнами для ввода-вывода излучения. Лазерное излучение распространялось в желтой части пламени длиной $l = 45$ мм; расстояние от оси пучка до среза кюветы $h = 20$ мм. Частота повторения импульсов, диаметр пучка и средняя мощность излучения на входе в пламя были фиксированными и составляли, соответственно, $f = 15$ Гц, $d_0 = 5.5$ мм и $\langle P_{\text{вх}} \rangle = 2.5$ Вт, что обеспечивает следующие значения входной импульсной мощно-

сти и интенсивности: $P_{\text{вх}}^{\text{н}} = \langle P_{\text{вх}} \rangle / (f\tau) = 1280 \text{ Вт}$ и $I_{\text{вх}}^{\text{н}} = P_{\text{вх}}^{\text{н}} / S = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ (здесь $S = \pi d_0^2 / 4$).

На рис.3 приведены зависимости выделяемой диафрагмой δ мощности рассеяния W от величины смещения X навстречу лучу переднего фронта пламени относительно центра диафрагмы δ , и от угла рассеяния φ . При этом $\varphi = 90^\circ$ соответствует взаимно-перпендикулярной ориентации осей скамьи с фотодиодом и лазерного пучка, $\varphi = 70^\circ$ и $\varphi = 110^\circ$ – соответственно повороту на 20° оси скамьи навстречу пучку и по ходу пучка.

Для оценки средней мощности, рассеянной пламенем в телесный угол 4π ср., было проведено усреднение значений W на рис.3 по φ и X и показано, что её доля относительно импульсной мощности на входе в пламя составляет $\sim 3 \cdot 10^{-3}$.

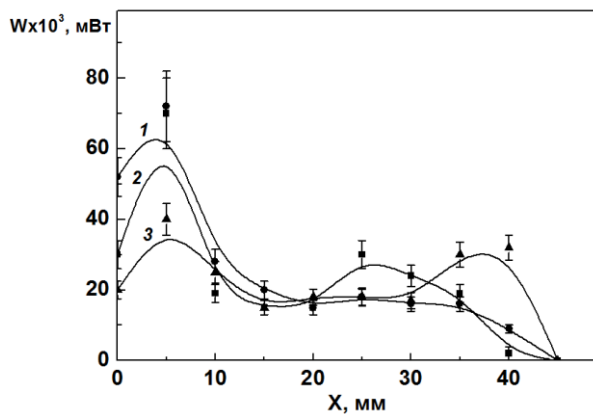


Рис.3. Зависимости W от X для пламени керосина при $\varphi = 90^\circ$ (1), 70° (2) и 110° (3). $\langle P_{\text{вх}} \rangle = 2.5 \text{ Вт}$, $f = 15 \text{ Гц}$, $d_0 = 5.5 \text{ мм}$, $h = 20 \text{ мм}$, $l = 45 \text{ мм}$.

Отметим, что при указанных значениях $I_{\text{вх}}^{\text{н}}$ и h взаимодействие излучения с пламенем сопровождается свечением трассы луча и появлением характерного звука на частоте следования импульсов. Это может быть связано с дополнительным нагревом и сгоранием в поле лазерного излучения частиц, находящихся в этой части пламени [20]. Основное рассеяние пламенем лазерного излучения происходит на этих частицах.

Общее ослабление мощности лазерного излучения при его распространении сквозь пламя описывается выражением:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \exp[-(\mu + \alpha)l], \quad (3)$$

где $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{вх}}$ – мощность излучения на выходе из пламя и на входе в пламя, μ и α – коэффициенты рассеяния и поглощения, соответственно.

В работе проводились измерения коэффициента поглощения излучения ИП Nd:YAG лазера и непрерывного волоконного Yb лазера пламенем керосина в за-

висимости от $P_{\text{вх}}$ и длины пламени l при интенсивности излучения на входе в пламя 10^3 Вт/см². Для определения коэффициента поглощения использовалось выражение $\alpha = -(1/l)\ln(P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}})$, т. к. доля рассеянного излучения мала и полагается, что $\mu \rightarrow 0$.

Коэффициент поглощения излучения относительно маломощного ИП Nd:YAG лазера при $I_{\text{вх}}^{\text{и}} \approx 10^3$ Вт/см² и фиксированной длине зоны пламени не зависит от $\langle P_{\text{вх}} \rangle = 0.6 \div 6.2$ Вт, т. к. из-за конвективного движения среды, в интервале между импульсами происходит её полное обновление и каждый последующий импульс взаимодействует с полностью обновлённой средой. В то же время величина α для непрерывного лазера при $I_{\text{вх}} \approx I_{\text{вх}}^{\text{и}} \approx 10^3$ Вт/см² при изменении $P_{\text{вх}}$ от 100 Вт до 3 кВт возрастает, что связано с увеличением скорости испарения керосина под действием расположенного над его поверхностью источника тепла в виде выделяющейся в пламени мощности излучения, приводящей к увеличению концентрации образующихся затем частиц, взаимодействующих с излучением.

При распространении излучения в жёлтой части пламени керосина коэффициент поглощения при увеличении l уменьшается для излучения обоих лазеров, однако при $l = \text{const}$ и одинаковой входной интенсивности $\sim 10^3$ Вт/см² его значение для непрерывного лазера больше, чем для ИП лазера. Уменьшение α при увеличении l связано с потерями энергии излучения на нагрев и дожигание частиц, а его возрастание для непрерывного лазера происходит из-за увеличения средней температуры частиц.

Измерения α для пламени смесей керосина с этиловым спиртом проводились для ИП Nd:YAG лазера при $I_{\text{вх}}^{\text{и}} = 4.6 \cdot 10^4$ Вт/см² и показали, что по мере увеличения концентрации спирта коэффициент поглощения уменьшается. В пламени чистого спирта, где частицы сажи отсутствуют, и поглощение определяется парами воды [21], α не зависит от режима работы лазера и интенсивности излучения $10^3 \div 5 \cdot 10^4$ Вт/см² и при одинаковой с пламенем керосина длине ~ 100 мм уменьшается на два порядка и составляет $0.0014 \div 0.0016$ см⁻¹.

Для измерений коэффициента поглощения излучения пламенем нефти и керосина в зависимости от интенсивности падающего излучения, изменяющейся в диапазоне $10^3 \div 10^6$ Вт/см², приёмник 7 на рис.1 был заменён на калиброванный фотодиод, измеряющий мощность рассеянного керсировой пластиной излучения, прошедшего сквозь пламя, а коллиматор 2, 3 формировал не параллельный, а сходящийся пучок. В качестве источника излучения использовался непрерывный одномодовый (BPP = 0.37÷0.38 мм·мрад, максимальная мощность излучения 1.5 кВт) или многомодовый (BPP = 3.5 мм·мрад, максимальная мощность излучения 2.7 кВт) Yb волоконный лазер. Лазерный луч был ориентирован вдоль пламени длиной $l \approx 30$ мм, центровался по отношению к фронту пламени и распространялся в его жёлтой части. Диаметр перетяжки для одномодового лазера составляет $d_0 = 1$ или 0.4 мм, а для многомодового лазера – 0.9 мм. Положение перетяжки соответствует центральной части пламени по ходу луча, а длина каустики для обоих лазеров намного превосходит l , так что диаметр пучка на длине l мало отличается от d_0 . Прямые измерения диаметра пучка с помощью прибора Beam Monitor (BM-100) свидетельствуют об отсутствии эффекта рефракционного уширения пучка и искривления его оси на выходе из пламени. По методике, основанной на использовании малогабаритного спектрометра [22], в работе измерялась температура выделенного диафрагмой центрального участка трассы луча.

На рис.4 представлены зависимости α от $I_{\text{вх}}$. Основная особенность приведенных зависимостей – резкое уменьшение α при $I_{\text{вх}} \geq 10^5$ Вт/см² и его стабилизация для пламени нефти на уровне менее 0.01 см⁻¹. Можно сказать, что при данных значениях $I_{\text{вх}}$ происходит просветление канала распространения излучения, причём эффект просветления не зависит от диаметра фокального пятна и качества излучения используемого лазера.

Интерпретация эффекта просветления основана на расчётах по формулам [23] времени сгорания углеродных частиц при измеренной температуре. Результаты расчётов показывают, что при $I_{\text{вх}} \geq 10^5$ Вт/см² для частиц радиусом $r_0 \leq 10$ мкм это время лежит в миллисекундном диапазоне и сравнимо с временем пролёта частицы поперёк лазерного луча в конвекционном потоке. Таким образом, части-

цы данного размера могут сгореть уже на периферии пучка и не будут препятствовать распространению излучения. Что касается более крупных частиц, то из-за их фрагментации при $I_{\text{вх}} \sim 10^5 \div 10^6$ Вт/см² [24] и последующего быстрого сгорания, они также не будут влиять на распространение излучения.

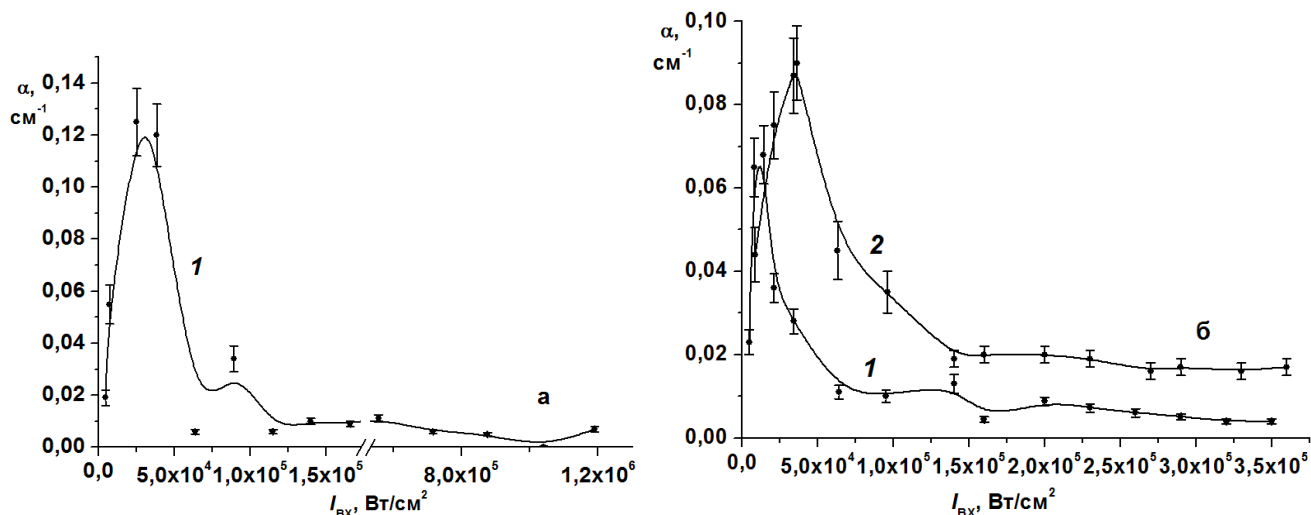


Рис.4. Зависимости α от $I_{\text{вх}}$ для пламени нефти (1) и авиационного керосина (2) при измерениях с одномодовым (а) и многомодовым (б) непрерывным волоконным лазером.

В третьей главе описаны условия и приводятся результаты экспериментов по дистанционной резке металлов и строительного бетона лазерным излучением. Возможность распространения излучения непрерывных волоконных Yb лазеров в пламени нефти с малым коэффициентом поглощения ~ 0.01 см⁻¹ при $I_{\text{вх}} \geq 10^5$ Вт/см² ставит задачу определения возможности и эффективности дистанционной резки этих материалов при значениях интенсивности на их поверхности $I_0 = I_{\text{вх}}$. Ранее такие исследования проводились только для металлов при $I_0 \sim 10^4$ Вт/см².

В таблицах 1, 2 приведены условия облучения (мощность излучения P_0 , интенсивность I_0 , диаметр фокального пятна на поверхности d_0) вертикально расположенных пластин из Ст.3 разной толщины H и стали А40Г горизонтальным пучком непрерывного волоконного Yb лазера.

Таблица 1. Условия облучения пластин из стали Ст.3.

| P_0 , кВт | 2.7 | | | | | | | | | | 7.5 | | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|
| | 1.5 | | 3 | | 4 | | 6 | | 10 | | 10 | | | |
| H , мм | 10^4 | 10^6 | 10^4 | 10^6 | 10^4 | 10^6 | 10^4 | 10^6 | 10^4 | 10^6 | $3.3 \cdot 10^3$ | 10^4 | 10^5 | $1.7 \cdot 10^6$ |
| d_0 , мм | 6 | 0.6 | 6 | 0.6 | 6 | 0.6 | 6 | 0.6 | 6 | 0.6 | 17 | 10 | 3 | 0.75 |

Таблица 2. Условия облучения пластины из стали А40Г.

| | | | | | |
|----------------------------|------------------|--------|------------------|----------------|------------------|
| P_0 , кВт | 7.5 | | | | |
| H , мм | 60 | | | | |
| I_0 , Вт/см ² | $3.3 \cdot 10^3$ | 10^4 | $2.7 \cdot 10^4$ | $6 \cdot 10^4$ | $2.4 \cdot 10^5$ |
| d_0 , мм | 17 | 10 | 6 | 4 | 2 |

На рис.5. представлены измеренные зависимости среднего размера отверстия D (1) и времени его формирования t (2) от H при $P_0 = 2.7$ кВт и $I_0 = 10^4$ Вт/см² (рис.5, а) и $I_0 = 10^6$ Вт/см² (рис.5, б). На рис.5, а показаны также результаты расчётов критического размера D_{cr} по модели вытекания расплава под действием силы тяжести [25] (сплошная кривая), пренебрегающей влиянием импульса отдачи паров ($I_0 \leq 10^4$ Вт/см²) и дающей неплохое согласие с измерениями. Хорошо согласуется с измерениями и расчёт времени удаления расплава для термически тонких пластин с $H = 1.5$ и 3 мм при $I_0 = 10^4$ Вт/см², дающий, соответственно, 3 с и 11.6 с.

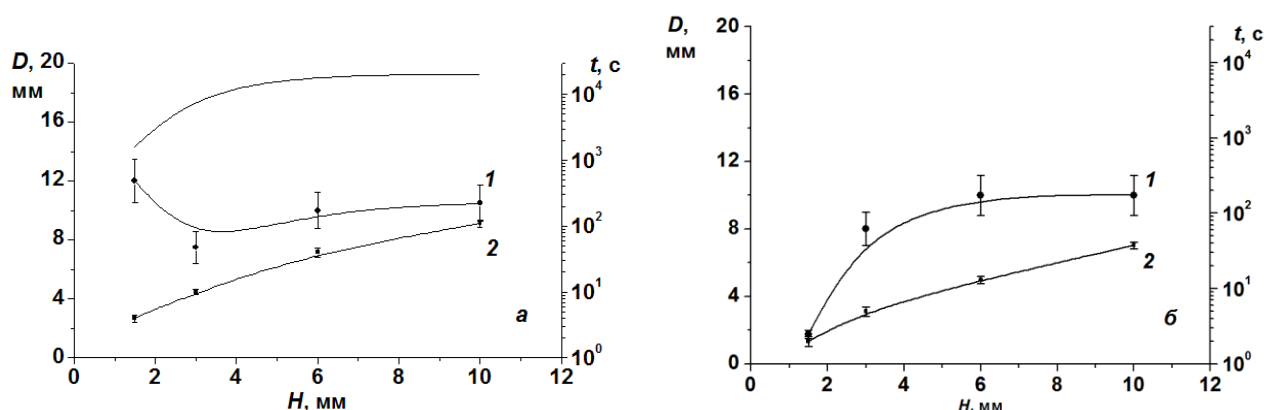


Рис.5. Измеренные зависимости D (1) и t (2) от H при $P_0 = 2.7$ кВт и $I_0 = 10^4$ (а) и 10^6 Вт/см² (б). Сплошная кривая – расчет D_{cr} из-за действия силы тяжести.

Как видно из рис.5, увеличение I_0 до 10^6 Вт/см² сопровождается заметным уменьшением времени сверления t для всех H . Это связано со сменой механизма удаления расплава под действием силы тяжести на механизм, обусловленный действием импульса отдачи паров, о чём свидетельствует визуально наблюдаемый интенсивный выплеск расплава навстречу лазерному лучу и результаты измерения температуры расплава в зоне воздействия излучения. В отличие от режима фонтанирования при $I_0 \sim 10^7 \div 10^8$ Вт/см², когда $D/d_0 \sim 1$, в наших условиях при $I_0 = 10^6$ Вт/см² для всех H выполняется неравенство $D/d_0 \gg 1$. Мы предполагаем, что в этих условиях действие лазерного излучения аналогично воздействию

двух лазеров [26]: на расплав, подготовленный излучением мощного лазера с небольшой интенсивностью, воздействуют интенсивными импульсами маломощного лазера с диаметром фокального пятна много меньшим размера расплава. При закипании металла в месте воздействия излучения маломощного лазера происходит удаление всего расплава за один импульс или послойное удаление за несколько импульсов. Отличие условий данной работы от условий [26] состоит в том, что излучение мощного и маломощного лазера объединены в одном пучке: основная часть пучка плавит металл, а небольшая доля излучения, локализованная в центральной части радиального распределения интенсивности, приводит к закипанию расплава и его удалению.

Для определения времени удаления необходимы численные расчёты для конкретной геометрии процесса. Однако если воспользоваться результатами измерения t на рис.5, б и оценить размер отверстия по выражению $D_T = 4(\chi t)^{1/2}$ (здесь $\chi = 0.1 \text{ см}^2/\text{с}$ – коэффициент температуропроводности), для всех H получим $D_T/d_0 \gg 1$, что соответствует измерениям ($D/d_0 \gg 1$) и может служить качественным подтверждением предполагаемого механизма удаления.

Увеличение мощности излучения должно привести к уменьшению времени сверления независимо от механизма удаления расплава. Этот вывод для пластины толщиной 10 мм при двух значениях $P_0 = 2.7$ и 7.5 кВт отражён в таблице 3.

Таблица 3. Основные параметры сверления пластины из стали Ст.3 толщиной $H = 10$ мм излучением мощностью $P_0 = 2.7$ и 7.5 кВт.

| P_0 , кВт | 2.7 | | 7.5 | |
|----------------------------|--------|--------|--------|------------------|
| I_0 , Вт/см ² | 10^4 | 10^6 | 10^4 | $1.7 \cdot 10^6$ |
| D , мм | 10.5 | 10 | 10 | 4 |
| D_{cr} , мм | 19.2 | - | 19.2 | - |
| Сила тяжести | | | | |
| t , с | 110 | 38 | 28 | 8 |

Действительно, для подготовки подлежащей удалению порции расплава необходима определённая энергия излучения, вложенная в образец, которая при увеличении мощности достигается за меньшее время. Сверление образца из стали А40Г толщиной 60 мм проводилось при двух значениях интенсивности $I_0 = 3.3 \cdot 10^3$ и 10^5 Вт/см². Измерения показали, что размер почти кругового входного отверстия $D_{вх}$ при $I_0 = 10^5$ Вт/см² равен 12 мм и в четыре раза превышает $d_0 = 3$ мм; среднее значение $D_{вх}$ при $I_0 =$

$3.3 \cdot 10^3$ Вт/см² составляет 21 мм и близко к $d_0 = 17$ мм. Средний размер выходных отверстий $D_{\text{вых}}$ примерно одинаков и равняется 8 мм. Время сверления не зависело от интенсивности излучения и составило 10.5 мин. Отметим, что на начальном этапе сверления, пока глубина каверны мала, выполняются те же условия, что и при сверлении пластин меньшей толщины: $D_{\text{вых}}/d_0 \sim 1$ при небольшой интенсивности $I_0 = 3.3 \cdot 10^3$ Вт/см², и $D_{\text{вых}}/d_0 \gg 1$ при повышенной интенсивности $I_0 = 10^5$ Вт/см².

Таким образом, при сверлении вертикальных стальных пластин лазерным излучением интенсивностью $I_0 = 10^5 \div 10^6$ Вт/см², сквозные отверстия при условии $d_0/H \ll 1$ получены в пластинах толщиной вплоть до 60 мм. Время сверления при данных значениях I_0 для пластин толщиной $H \leq 10$ мм заметно меньше времени при сверлении излучением интенсивностью $I_0 \leq 10^4$ Вт/см², и только для $H = 60$ мм эти времена становятся сравнимыми. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что по крайней мере для пластин толщиной до 60 мм сняты опасения о затрудненном удалении расплава из узкого и глубокого канала при малом диаметре пучка хоть и при повышенной, но сравнительно небольшой интенсивности. Уменьшение времени сверления при увеличении интенсивности сокращает время подготовки к дистанционной резке, которая иногда начинается с формирования сквозного отверстия в металле.

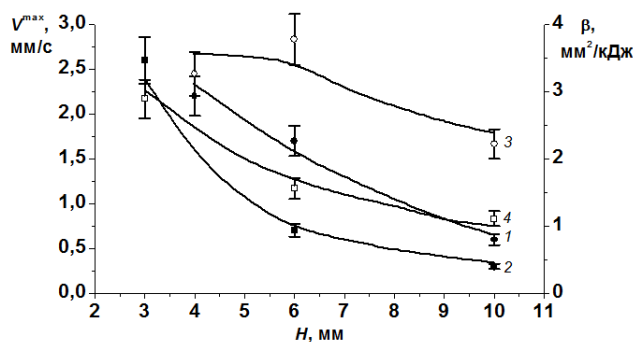


Рис.6. Зависимости V^{max} (1, 2) и β (3, 4) от H при $P_0 = 2.7$ кВт и $I_0 = 10^6$ (1, 3) и 10^4 Вт/см² (2, 4).

На рис.6 для $P_0 = 2.7$ кВт представлены зависимости от H максимальной скорости V^{max} перемещения луча, при которой ещё существует сплошной сквозной рез (зависимости 1 и 2), и зависимости от H эффективности резки $\beta = (V^{\text{max}} \cdot H)/P_0$, определяемой как площадь реза, приходящаяся на единицу затрачиваемой энергии (зависимости 3 и 4).

Из представленных зависимостей следует, что при резке с повышенной интенсивностью 10^6 Вт/см² максимальная скорость увеличивается и, как следствие, возрастает эффективность резки. Эффективность резки при повышенной интенсивности возрастает и при увеличении мощности излучения. Так, для $H = 10$ мм, $P_0 = 7.5$ кВт и при $I_0 = 10^5 \div 1.7 \cdot 10^6$ Вт/см² она достигает 2.2 мм²/кДж, тогда как при $I_0 = 3.3 \cdot 10^3 \div 10^4$ Вт/см² она составляет 1.9 мм²/кДж. Если ширину получаемых резов h сопоставить с размером отверстия D при сверлении, то, как и при сверлении, выполняются соотношения: $h/d_0 \sim 1$ при $I_0 \leq 10^4$ Вт/см² и $h/d_0 \gg 1$ при $I_0 \geq 10^5$ Вт/см².

Полученные значения эффективности заметно превосходят величину $\beta = 0.5$ мм²/кДж при дистанционной резке стальных пластин толщиной $H > 2$ мм излучением непрерывного СО₂-лазера [27]. Уменьшение эффективности для СО₂-лазера может быть связано с влиянием на качество пучка и на его мощность приповерхностного плазменного факела при повышенной интенсивности $\sim 10^5 \div 10^6$ Вт/см², который при использовании излучения волоконного Yb лазера вблизи поверхности не возникает.

При решении задач по дистанционной разделительной резке на аварийных нефтегазоконденсатных месторождениях иногда приходится иметь дело с толсто-стенными конструкциями, толщина которых составляет несколько десятков миллиметров. С этой целью и был выбран образец из стали А40Г толщиной 60 мм. В процессе резки образца были проведены измерения температуры облучаемого участка поверхности.

На рис.7 показаны зависимости средней фронтальной ширины реза h (зависимость 1) и отношения h/d_0 (зависимость 2) от I_0 при $V = 0.1$ мм/с. В диапазоне изменения интенсивности $(1 \div 6) \cdot 10^4$ Вт/см², на котором температура T изменяется от 2000°С до 2500°С и не превышает температуру кипения стали (2650°С), и поэтому влиянием давления отдачи паров можно пренебречь, ширина реза $h = 21 \div 22$ мм из-за небольшой скорости перемещения пучка хорошо согласуется с расчётом по модели вытекания за счёт силы тяжести ($D_{cr} = 19.2$ мм) и с результатом измере-

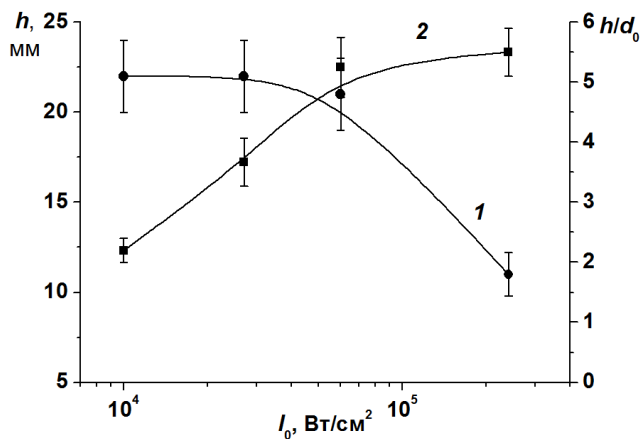


Рис.7. Зависимости h (1) и h/d_0 (2) от I_0 при резке стали А40Г толщиной 60 мм при $P_0 = 7.5$ кВт и $V = 0.1$ мм/с.

мерениям h и D при резке и сверлении пластин другой толщины.

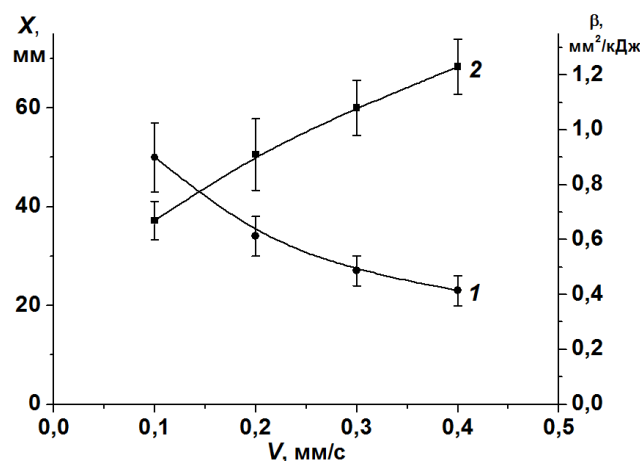


Рис.8. Зависимости глубины реза X (1) и эффективности резки β (2) от V при резке стали А40Г толщиной 60 мм при $I_0 = 10^5$ Вт/см².

получен даже при минимальной скорости 0.1 мм/с не вызывает опасений, т. к. при этой скорости можно резать образец толщиной 50 мм лазерным излучением мощностью всего лишь 7.5 кВт с достаточно высокой эффективностью ≈ 0.7 мм²/кДж.

На некоторых месторождениях в конструкции газового превентора может применяться бетон толщиной в несколько сантиметров. Слой бетона перекрывает

ний ($D_{\text{вх}} = 21$ мм), полученными при сверлении. Согласно с результатом измерений между $h = 11$ мм и $D_{\text{вх}} = 12$ мм наблюдается и при $I_0 = 2.4 \cdot 10^5$ Вт/см², соответствующей удалению расплава под действием давления отдачи паров ($T = 2600 \div 2800^\circ\text{C}$). Переход к этому механизму удаления отражает также монотонно возрастающая зависимость 2 на рис.7. Характер ее изменения от I_0 соответствует из-

В ходе экспериментов проводились измерения глубины реза X от скорости V перемещения пучка при $I_0 = 10^5$ Вт/см² ($d_0 = 3$ мм). Результаты измерений приведены на рис.8 (зависимость 1). На этом же рисунке показана зависимость от V эффективности не сквозной резки, определяемой как $\beta = VX/P_0$ (зависимость 2). Тот факт, что в соответствии с рис.8 сквозной рез стального образца толщиной 60 мм не

доступ лазерного излучения к металлу, поэтому исследование условий резки бетона представляет практический интерес.

Резка бетонных образцов с размерами 310×310×180 мм осуществлялась горизонтальным пучком непрерывного волоконного Yb лазера мощностью 7.5 кВт при фиксированной скорости $V = 0.1$ мм/с и тех же значениях интенсивности, что и в экспериментах со сталью А40Г. Результаты измерений средней фронтальной ширины h и глубины X реза приведены на рис.9 и 10. Измерения температуры при резке показали, что её наиболее высокое значение $T = 3500^\circ\text{C}$, превышающее температуру кипения SiO_2 (2950°C), соответствует $I_0 = 2.4 \cdot 10^5$ Вт/см², а на интервале $I_0 = (1 \div 6) \cdot 10^4$ Вт/см² температура изменяется в диапазоне $(2200 \div 2700)^\circ\text{C} < 2950^\circ\text{C}$.

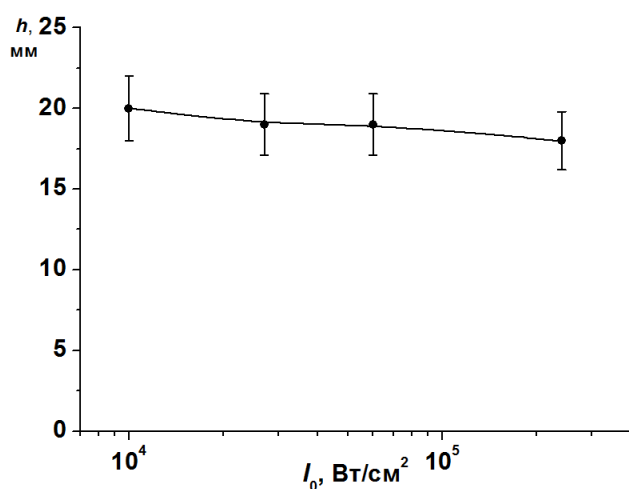


Рис.9. Зависимость h от I_0 при резке бетона.

$P_0 = 7.5$ кВт, $V = 0.1$ мм/с.

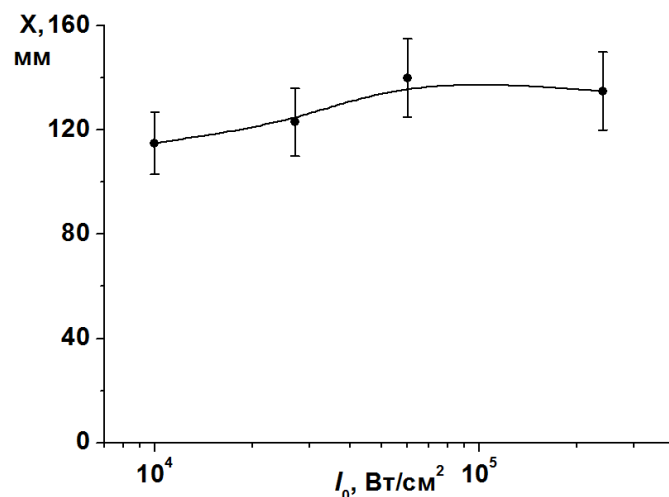


Рис.10. Зависимость X от I_0 при резке бетона.

$P_0 = 7.5$ кВт, $V = 0.1$ мм/с.

Ширина реза на этом интервале составляет ≈ 20 мм и близка к ширине при резке стали (рис.7) из-за близости капиллярного радиуса [5] для бетона и стали. Однако переход к повышенной интенсивности $I_0 = 2.4 \cdot 10^5$ Вт/см² не сопровождается заметным уменьшением h , как это происходило при резке с той же скоростью стали А40Г. Это отличие мы связываем с тем, что конденсация паров на стенках глубокого канала в бетоне при данной I_0 приводит к прогреву стенок и образованию расплава шириной $\sim h$, удаляемому затем под действием силы тяжести. А конденсация части паров вблизи фокального пятна, граничащего с дном канала, может привести к образованию расплава, препятствующего распространению излучения.

Этим можно объяснить меньшую, чем ожидалось, глубину реза при $I_0 = 2.4 \cdot 10^5$ Вт/см².

Эффективность резки бетона при $V = 0.1$ мм/с, $I_0 = 2.4 \cdot 10^5$ Вт/см² и $X = 120$ мм равна 1.6 мм²/кДж и более чем в два раза превышает эффективность резки стали А40Г при той же скорости и близкой интенсивности.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

Основные результаты:

- Создана экспериментальная установка для исследования взаимодействия лазерного излучения с длиной волны ≈ 1 мкм с диффузными пламенами углеводородов, горящих на свободной поверхности при нормальных условиях, и проведения исследований по дистанционной резке горизонтальным лазерным пучком вертикальных металлических пластин и строительного бетона.
- Впервые проведены измерения доли мощности излучения Nd:YAG лазера с длиной волны 1.06 мкм, рассеянного спокойным пламенем керосина. Показано, что эта доля невелика и не превышает $\sim 3 \cdot 10^{-3}$.
- Проведены первые измерения среднего на длине пламени коэффициента поглощения излучения ИП Nd:YAG лазера и непрерывного волоконного Yb лазера в зависимости от мощности излучения, состава пламени и его длины при интенсивности излучения на входе в пламя $10^3 \div 10^4$ Вт/см². Показано, что коэффициент поглощения излучения ИП Nd:YAG лазера пламенем керосина не зависит от входной мощности, тогда как для непрерывного волоконного лазера увеличение мощности приводит к его возрастанию. Установлено, что при распространении излучения в жёлтой части пламени керосина коэффициент поглощения при увеличении длины пламени уменьшается для излучения обоих лазеров, однако при фиксированной длине и одинаковой входной интенсивности 10^3 Вт/см² его величина для непрерывного волоконного лазера больше. Было показано, что при увеличении концентрации спирта в смеси керосина со спиртом, коэффициент поглощения монотонно уменьшается и для пламени

чистого спирта его величина намного меньше, чем для пламени керосина, и не зависит от интенсивности излучения и типа лазера.

- Обнаружен эффект просветления канала распространения излучения непрерывного волоконного Yb лазера в пламени нефти и керосина, состоящий в сильном уменьшении коэффициента поглощения при интенсивности на входе в пламя $\geq 10^5$ Вт/см² и его стабилизации при дальнейшем увеличении интенсивности вплоть до 10^6 Вт/см² на уровне $5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-2}$ см⁻¹. Предположение о том, что при указанных значениях интенсивности присутствующие в пламени частицы полностью сгорают в поле лазерного излучения за время их пролёта из-за конвекции поперёк лазерного пучка и поэтому не препятствуют распространению излучения, подтверждается расчётами времени сгорания при измеренной в экспериментах температуре частиц в пределах трассы пучка в пламени.
- Продемонстрирована возможность эффективной дистанционной обработки металлов (сверление, резка) излучением непрерывных волоконных Yb лазеров при интенсивности излучения на поверхности $10^5 \div 10^6$ Вт/см². Показано, что время сверления стальных пластин толщиной до 10 мм излучением мощностью до 2.7 кВт уменьшается, а эффективность их резки возрастает при переходе от интенсивности 10^4 Вт/см² к 10^6 Вт/см². Показано также, что при мощности излучения 7.5 кВт и интенсивности 10^5 Вт/см² время сверления толстостенного металла толщиной 60 мм и эффективность резки остаются на уровне, соответствующем интенсивности 10^4 Вт/см², несмотря на удаление расплава из узкого и глубокого канала.
- Глубина не сквозного реза бетона при мощности излучения непрерывного волоконного Yb лазера 7.5 кВт, интенсивности 10^5 Вт/см² и скорости перемещения луча 0.1 мм/с достигает 120 мм и в 2.4 раза превосходит глубину не сквозного реза стали (50 мм) при тех же условиях, что приводит к более чем двукратному увеличению эффективности резки бетона по сравнению с эффективностью резки стали.

Основные выводы:

- Небольшая доля рассеянного пламенем излучения не представляет опасности для персонала при проведении восстановительных работ в устье аварийного нефтегазового месторождения с помощью излучения непрерывных волоконных Yb лазеров с длиной волны 1.07 мкм.
- Наличие слоя бетона толщиной в несколько см, окружающего металлический преентор в устье аварийной скважины, не является препятствием для резки преентора и приводит лишь к дополнительным затратам энергии лазерного излучения.
- Современные мощные волоконные лазеры имеют достаточно высокое качество излучения и способны обеспечить значение интенсивности $\sim 10^5$ Вт/см² на больших расстояниях от фокусирующей системы до поверхности объекта взаимодействия, типичных для дистанционной резки. Обнаруженный в данной работе эффект просветления канала распространения излучения в пламени нефти и показанная возможность эффективной резки металла при указанной интенсивности могут быть использованы при разработке универсальных мобильных лазерных технологических комплексов, предназначенных для дистанционной резки металлоконструкций и бетона не только аварийных газовых, но и нефтяных скважин, а также способных решать другие задачи по дистанционной резке, такие как: задачи МЧС, разделка корпусов списанных судов, демонтаж строительных объектов и т. д.

Список цитируемой литературы:

1. Создание лазерного комплекса для проведения аварийно- восстановительных работ на объектах газовой промышленности: отчёт о НИОКР (заключительный)/ ГНЦ РФ ТРИНИТИ; руководитель А.Г. Красюков; инв. №НИОКР №5448-00-5; исполнители: Востриков В.Г., Наумов В.Г. и др. - Троицк, 2000. - 123 с.
2. Поставка мобильного лазерного технологического комплекса МЛТК – 20: отчёт о НИР (заключительный)/ ГНЦ РФ ТРИНИТИ; руководитель А.Г. Красю-

- ков; инв. №10/НИР – 6629 от 24.12.10; исполнители: Дубровский В.Ю., Смирнов Г.В., Гвоздев С.В. и др. - Троицк, 2010.- 66 с.
3. Официальный интернет-сайт ООО НТО «ИРЭ-Полус» – URL: <http://www.ntoire-polus.ru/>
 4. Комплекс лазерный мобильный МЛТК-50 для дистанционной резки металлоконструкций/ Блохин О.А., Востриков В.Г., Гаврилюк В.Д. и др.// Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2001. №5.-С.52.
 5. Механизм создания отверстий в вертикально расположенных металлических пластинах непрерывным излучением CO₂-лазера/ Лиханский В.В., Лобойко А.И., Красюков А.Г. и др.// Квантовая электроника. 1999.-Том 26; №2.-С.139-143.
 6. Майоров В.С. Особенности и механизмы физических явлений и процессов, происходящих при лазерной обработке металлов: Дис...д-ра физ.-мат. наук-М., 2001.-253 с.
 7. Дистанционная обработка металлов излучением двух лазеров/ Глова А.Ф., Дробязко С.В., Вавилин О.И. Швом Е.М.// Квантовая электроника. 2002.-Том 32; №2.-С.169-171.
 8. Maher W.E., Hall R.V. Journal of Applied Physics.-1976. №47.-p.2486.
 9. Взаимодействие излучения, плазменных и электронных потоков с веществом/ Боркин А.Г., Гладуш Г.Г, Дробязко С.В. Казаков В.Н. - М.: ЦНИИатоминформ, 1984.-97 с.
 10. Воздействие лазерного излучения на материалы/ Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.А. и др. - М.: Наука, 1989.-365с.
 11. Технологический ИАГ:Nd-лазер с трёхзеркальным резонатором и его применение/ Басиев Т.Т., Кравец А.Н., Крайнов А.С., Федин А.В.// Квантовая электроника. 1998.-Том 25; №6.-С.525-528.
 12. Tretyakov P.K., Vorontsov S.S., Tupikin A.V. Effect of pulse-periodic CO₂-laser radiation on premixed combustion of hydrocarbon fuels: Nonequilibrium processes // Combustion and Flame.-2005. Vol. 1; pp.74-83.

13. Козлов Г.И., Кузнецов В.А., Сокуренок А.Д. Сильное воздействие мощного излучения CO₂-лазера на горение пропано-воздушных смесей // Письма в ЖТФ.-1990. Том 16; Вып.9.-С.55-58.
14. Структура диффузионных пропиленовых сажестых и бессажевых пламён при облучении лазером/ Ли Ч.Б., Ли В., О К.Ч., Шин Х.Д., Ён Д.-К// Физика горения и взрыва.-2006. Том 42; С.74-81.
15. Глова А.Ф., Лысиков А.Ю., Зверев М.М. Особенности взаимодействия лазерного излучения с газопылевой средой // Квантовая электроника.-2009. Том 39; №6.-С.537.
16. Андрухова Т.В., Потехин Е.Ю. Динамика размеров и температуры аэрозольных частиц в мощных оптических полях при пониженном давлении // Известия Алтайского государственного университета.-1999.-№1 (11).-С.1-4.
17. Андрухова Т.В., Букатый В.И. Экспериментальные исследования испарения частиц в вакууме под действием CO₂-лазера // Известия Алтайского государственного университета.-2002.-№1 (23).-С.99-103.
18. Computational and experimental studies of laser-induced thermal ignition in pre-mixed ethylene-oxidizer mixtures/ Tanoff M.A., Smooke M.D., Teets R.E., Sell J.A.// Combustion and Flame-1995. Vol. 103; №4.-pp.253-280.
19. Trott W.M. CO₂-laser-induced deflagration of fuel/oxygen mixture// Journal of Applied Physics.-1983. Vol. 54; №1.-pp.118-130.
20. Структура диффузионных пропиленовых сажестых и бессажевых пламён при облучении лазером/ Ли Ч.Б., Ли В., О К.Ч., Шин Х.Д., Ён Д.-К// Физика горения и взрыва.-2006. Том 42; С.74-81.
21. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. - М.: Мир, 1987.-550 с.
22. Нанесение покрытий при лазерном облучении газопылевой среды/ Глова А.Ф., Лысиков А.Ю., Нелюбин С.С., Перетяцько П.И., Рыжков Ю.Ф., Турундаевский В.Б.// Ядерная физика и инжиниринг.-2014. Том 5; №11-12.-С.1024-1032.
23. Хитрин А.Н. Физика горения и взрыва. - М.: Издательство МГУ, 1957.-450 с.

24. Андрухова Т.В., Букатый В.И. Экспериментальные исследования испарения частиц в вакууме под действием CO₂-лазера // Известия Алтайского государственного университета.-2002.-№1 (23).-С.99-103.
25. Механизм создания отверстий в вертикально расположенных металлических пластинах непрерывным излучением CO₂-лазера/ Лиханский В.В., Лобойко А.И., Красюков А.Г. и др.// Квантовая электроника. 1999.-Том 26; №2.-С.139-143.
26. Дистанционная обработка металлов излучением двух лазеров/ Глова А.Ф., Дробязко С.В., Вавилин О.И. Швом Е.М.// Квантовая электроника. 2002.-Том 32; №2.-С.169-171.
27. О механизме дистанционной резки металлов излучением CO₂-лазера/ Антонова Г.Ф., Гладуш Г.Г., Красюков А.Г., Косырев Ф.К., Родионов Н.Б.// Теплофизика высоких температур.-2000. Том 38; №3.-С.501-506.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Гвоздев С.В., Глова А.Ф., Дубровский В.Ю. и др. Поглощение и рассеяние лазерного излучения диффузионным пламенем авиационного керосина. Квантовая электроника, 2012, т. 42, №4, с. 350-354.
2. Gvozdev S.V., Glova A.F., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. Efficiency of laser materials processing in presence of water medium and flame / The XIX Int. Symp. on high Power Laser System and Application, Istanbul, 10-14 Sept. 2012. Scientific Program, Report S7-2.
3. Гвоздев С.В., Глова А.Ф., Дубровский В.Ю., Дурманов С.Т., Красюков А.Г., Лысиков А.Ю., Смирнов Г.В. Эффективность лазерной обработки материалов в присутствии пламени и водной среды / Программа XV Международной научной конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул», 1-5 окт. 2012 г., Звенигород, с.23.
4. Гвоздев С.В., Глова А.Ф., Дубровский В.Ю., Дурманов С.Т., Красюков А.Г., Лысиков А.Ю., Смирнов Г.В. Эффективность лазерной обработки материалов в присутствии пламени и водной среды. Перспективные материалы. Специальный выпуск №14, 2013, с. 225-232.

5. Gvozdev S.V., Glova A.F., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. Influence of water medium and flame on the processes of laser materials treatment / Proc. of CAOL2013, Sudak, Sept. 9-13, 2013, pp. 88-90.
6. Rodin A.V., Gvozdev S.V., Glova A.F., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. Propagation of laser radiation through diffusion flames / The 21th annual Int. Conf. on Advanced Laser Technologies, ALT'13, Budva, Montenegro 16-20 Sept, 2013. Book of Abstracts, p.93.
7. Gvozdev S.V., Glova A.F., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. Influence of water medium and flame on the processes of laser materials treatment / The 20th Int. Symp. on high Power Laser System and Application, 25-29 Aug. 2014, Chengdu, China, Conf. Program, p.17.
8. Гладуш Г.Г., Глова А.Ф., Красюков А.Г., Гвоздев С.В., Лысиков А.Ю., Свотин П.А., Рерих В.К., Таран М.Д. Исследование механизмов пробивания отверстий излучением непрерывного волоконного лазера в стальных пластинах. XI конф. «Лазеры и лазерно-информационные технологии: Фундаментальные проблемы и применения» (ILLA2014, г. Шатура, 29 сент. – 3 окт., 2014). Секция лазерные технологии обработки материалов. Тезисы докладов, с. 18-19.
9. Гвоздев С.В., Глова А.Ф., Дубровский В.Ю. и др. Прохождение интенсивного лазерного излучения сквозь диффузионное пламя горячей нефти. Квантовая электроника, 2015, т. 45, №6, с. 582-584.
10. Gvozdev S.V. Glova A.F. Dubrovskii V.Yu. Durmanov S.T. Krasnyukov A.G. Lysikov A.Yu. Smirnov G.V. Pleshkov V.M. Laser irradiation diffusion in flame of burning hydrocarbons and the effectiveness of metals remote cutting, Журнал прикладной спектроскопии, 2016, т. 83, № 6-16, с. 507-508.
11. Гладуш Г.Г., Глова А.Ф., Головичёв В.И., Гвоздев С.В., Красюков А.Г., Лысиков А.Ю., Рерих В.К., Таран М.Д. Известия РАН. Серия физическая, 2016, том 80, №4, с. 434-438.
12. Glova A.F., Gvozdev S.V., Gladush G.G., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. Pleshkov V.M. Remote processing

- of metals with an increased laser radiation intensity / Proc. of CAOL2016, Ukraine, Odessa, Sept.12-15, 2016, pp. 8-10.
13. Gvozdev S.V., Glova A.F., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V., Pleshkov V.M. Laser irradiation diffusion in flame of burning hydrocarbons and the effectiveness of metals remote cutting / ICONO/LAT 2016, Minsk, Belarus, Sept.26-30, 2016, Conference Program, p.66, report LTuK58.
 14. Гвоздев С.В., Глова А.Ф., Дубровский В.Ю., Дурманов С.Т., Красюков А.Г., Лысиков А.Ю., Смирнов Г.В., Плешков В.М. III Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2017», 24-27 января 2017 г., Россия, НИЯУ МИФИ. Сборник научных трудов, с. 240.
 15. Gvozdev S.V., Glova A.F., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. and Pleshkov V.M. Attenuation of laser radiation by the flame of burning hydrocarbons and efficiency of remote cutting of metals. – Journal of Physics: Conf. Series 941 (2017).
 16. Gvozdev S.V., Glova A.F., Gladush G.G., Dubrovskii V.Yu., Durmanov S.T., Krasnyukov A.G., Lysikov A.Yu., Smirnov G.V. and Pleshkov V.M. Remote processing of metals with laser radiation with increased intensity. – Inorganic Materials: Applied Research, 2017, Vol.8, No. 5, pp. 795-801.