

Лазеры. Измерения. Информация



Том 1, № 3 / 2021

Новороссийск
2021

Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Том № 01. № 03 (03)
<https://lasers-measurement-information.ru>

Лазеры. Измерения. Информация
Научный сетевой журнал
Издаётся с марта 2021 года
Выходит 4 раза в год
ISSN 2713-0568

Том 1, № 3 (3)
Сентябрь-ноябрь 2021 г.

Главный редактор: В. Е. Привалов
Ответственный редактор: В. Г. Шеманин

Редакционная коллегия: А. Н. Власов, В. Н. Дёмкин, Г. С. Евтушенко, И. Г. Иванов,
М. М. Кугейко, Г. П. Михайлов, Л. А. Русинов, А. Л. Соколов, В. А. Степанов,
А. А. Тихомиров, С. А. Филист, А. Э. Фотиади, Е. Г. Чуляева

Учредитель: ФГБОУ ВО БГТУ им. В. Г. Шухова
Издатель: Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске
Адрес редакции:
353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75
Тел. +78617221333
<https://lasers-measurement-information.ru>
e-mail: editor-laser@nb-bstu.ru

Свидетельство о регистрации: серия Эл № ФС77-81070 от 02 июня 2021 г.

Опубликовано 18.11.2021

© Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске, 2021

Содержание:

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Туркин В. А., Сарычев И. А., Чартий П. В., Письменская Ю. В., Джисоев Р. И.
 Лазерный дистанционный мониторинг выбросов сажи судовым энергетическим
 оборудованием стр. 4

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

*Афонин О. Ю., Орлов М. Ю., Ульянов И. В., * Степанов В. А.*
 Обучение техническому творчеству и работе на лазерном станке с ЧПУ
 подростков в системе дополнительного образования стр. 16

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Веденин Е. И., Половченко С. В., Сарычев И. А., Чартий П. В.
 Обработка сигналов лидара дифференциального ослабления лазерного
 излучения в аэрозольном потоке стр. 23

Степанов В. А., Овчинникова Е. В., Серебряков А. О.
 Автоматизированное 3D проектирование активного элемента газоразрядного
 ионного аргонового лазера стр. 32

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Андреев Д. П.
 Исследование особенностей формирования высокоскоростной
 последовательности оптических импульсов с перестройкой несущей частоты
 для ВОЛС со спектральным уплотнением каналов стр. 38

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА. КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Осипов В. В., Тихонов Е. В., Платонов В. В., Лисенков В. В., Кременецкий М. В.
 Исследование оптических резонансов, возникающих в рассеянном поле
 излучения волоконного Yb-лазера в прозрачных диэлектрических средах стр. 42

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_4

УДК 551.510

ГРНТИ 29.31.27

Лазерный дистанционный мониторинг выбросов сажи судовым энергетическим оборудованием

^{1*} Туркин В. А., ² Сарычев И. А., ² Чартий П. В., ¹ Письменская Ю. В., ¹ Джиоев Р. И.

¹ 353918, Россия, Новороссийск, пр. Ленина 39, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова

² 353900, Россия, Новороссийск, ул. Карла Маркса 20, Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ

e-mail: * turvla@mail.ru, eniac001@yandex.ru, pvc-60@yandex.ru,
yuliyapismenskaya@mail.ru, djioev_ri@mail.ru

При сгорании топлива в судовом двигателе образуются частицы сажи, которые сорбируют в себе токсичные компоненты отработавших газов. Размеры этих частиц варьируются от 0,1 до 100 мкм. В области возможных диапазонов варьирования размеров частиц сажи актуальным является видимая и ближняя ИК-область электромагнитных волн. Решая обратную задачу ослабления и рассеяния света частицами можно получить информацию о концентрации и функции распределения частиц по размерам. Выполнен анализ возможности одновременной оценки концентрации и дисперсности лазерным методом дифференциального ослабления и описан вариант его технической реализации. Разработана четырех волновая лазерная система, которая позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения методом дифференциального ослабления на трех длинах волн и сигнал рассеяния Ми на частицах аэрозоля излучения четвертого лазера. По измеренным сигналам ослабления рассчитан средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц. Измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн на разработанной лазерной установке в составе экспериментального стенда, что позволяет рассчитать значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц. Показано, что в зависимости от диапазона размеров частиц сажи выбираются соответствующие длины волн лазерного зондирования. Применение метода дифференциального ослабления лазерного излучения частицами сажи в выбросах судовых энергетических установок на нескольких длинах волн позволяет оценивать одновременно их концентрацию и характеристики дисперсности.

Ключевые слова: судовые энергетические установки, отработавшие газы, размер частиц сажи, лазерный метод.

Введение

Все российские грузовые порты должны быть оснащены системами непрерывного экологического мониторинга. Это требование необходимо закрепить на законодательном уровне, заявил президент Владимир Путин на пленарном заседании Восточного

экономического форума 3 сентября 2021 года. Также президент отметил: «Считаю, что <...> грузовые порты России, не только Находка, Владивосток, но и Мурманск, Калининград, Новороссийск и другие были оснащены системами непрерывного экологического мониторинга».

В настоящее время значительно возросли требования со стороны Международной морской организации (ИМО) к сокращению выбросов различных токсичных веществ в составе отработавших газов судовых энергетических установок [1].

По сравнению со всеми другими видами транспорта, морской транспорт является оптимальным видом транспорта (на тонну перевалки груза) с точки зрения экономической эффективности и снижения выбросов в окружающую среду. На его долю приходится более 80% мировой торговли, и, по прогнозам, в ближайшие годы он будет расти [2]. Однако выбросы отработавших газов с судов оказывают глубокое влияние на окружающую среду и, следовательно, на здоровье человека, и за последние двадцать лет стали глобальной проблемой [3–5]. Более 70% выбросов с судов могут оказывать воздействие на расстояние до 400 км вглубь суши и стали важным источником глобальных антропогенных выбросов, особенно в окрестностях прибрежных районов и портов. Выбросы, связанные с судоходством, являются причиной повышения уровня содержания в воздушной среде как твердых частиц (сажа и другие), так и газообразных загрязнителей [2].

Твердые частицы представляет собой сложную смесь чрезвычайно мелких твердых и жидких частиц. В частности, они состоят из ряда компонентов, включая углеродистые элементы, кислоты, органические химические вещества, металлы и частицы пыли, которые в значительной степени способствуют изменению климата [5]. В 2012 году отработавшие газы дизельных двигателей были классифицированы Международным агентством по изучению рака (IARC), входящим в состав Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), как канцерогенное вещество для здоровья человека (группа 1, как и асбест). В глобальном масштабе выбросы мелких твердых частиц (PM_{2,5}), связанные с судоходством, являются причиной около 60 000 смертей ежегодно в результате сердечно-легочных и легочных заболеваний [6]. Большинство смертей произошло в районах с высокой плотностью населения и высокой концентрацией частиц, таких как Азия и Европа, и прогнозировалось, что к 2012 году ежегодная смертность увеличится на 40% [6].

Выбросы от судов у причала и во время маневрирования составляют относительно небольшую часть общего загрязнения от судоходства в открытом море, однако они могут оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье окружающего населения из-за их близости к районам с высокой плотностью населения.

Дистанционный непрерывный мониторинг выбросов сажи с судов в условиях маневрирования на акватории и стоянки в портах необходимо производить, поскольку это потенциально позволяет количественно оценить воздействие на здоровье и, следовательно, может эффективно ограничивать риски для здоровья указанных выбросов в таких районах, как порты или портовые города.

Новые технологические возможности дистанционного мониторинга, реализованные на технологической базе современных компьютеров, дают возможности повышения экологического мониторинга на базе технологии дистанционного лазерного сканирования выбросов с судов. Применение технологии сканирования выбросов судами, с применением «экологических» лазеров, даёт эффективный инструмент контроля портовым службам и администрациям портов по выполнению Российского законодательства в сфере охраны окружающей среды, а также VI Приложения Международной Конвенции МАРПОЛ 73/78. Система непрерывного экологического

мониторинга на базе технологии лазерного сканирования выбросов требует применения спектрального анализа высокой чёткости, в этом контексте наряду с использованием технологии лазерного сканирования требуются разработка методологии фильтрации данных мониторинга высокой чёткости.

Постановка задачи исследования

Выбросы судовых энергетических установок состоят из оксидов азота, углерода, серы, высокомолекулярных ароматических углеводородов и твёрдых частиц [7]. Твёрдые частицы представляют собой сажу, образовавшуюся в результате неполного сгорания наиболее тяжелых фракций топлива и машинного масла, а также окислы металлов, сульфаты и вода. В процессе своего образования эти частицы насыщаются большим количеством молекул углеводородов и при попадании в дыхательные пути представляют опасность, в значительной степени, обусловленную наличием в них канцерогенных полициклических ароматических углеводородов. Частицы, содержащие тяжелые металлы и другие соединения также представляют большую опасность для органов дыхания человека. При этом экологическому нормированию подлежит только концентрация твердых частиц [7].

Размер частиц в значительной степени определяет поведение самих частиц в воздушной среде и степень их внедрения в органы дыхания человека [7]. Так крупные частицы размером более 10 мкм, как правило, оседают в носоглотке и создают, в большей степени, гигиенический дискомфорт. Частицы размером менее 10 мкм уже проникают в трахеи и альвеолы легких человека, представляя наибольшую опасность для здоровья человека. По этой причине во многих странах, в том числе и в России, определены дифференцированные гигиенические нормативы твердых частиц в воздушной среде [8]. Кроме того, от размеров частиц в значительной степени зависит их сорбционная способность. Так с уменьшением размеров частиц растет их удельная поверхность и, как следствие, адсорбционная способность. Кроме того, распределение частиц сажи по размерам может явиться дополнительной характеристикой эффективности теплообмена в камере сгорания дизеля [8]. Из всего этого следует необходимость контроля не только концентрации, но и распределения частиц сажи по размерам. Из отмеченного выше следует необходимость контроля не только концентрации, но и распределения частиц сажи по размерам. Цель данного исследования – экспериментальное подтверждение работоспособности предлагаемого метода мониторинга вредных выбросов.

Выбор метода

Есть различные методы одновременного измерения концентрации и распределения частиц по размерам. Но нужны такие, которые позволят проводить измерения в режиме реального времени, чтобы своевременно выявлять и предотвращать достижение ими предельно допустимых значений.

Для выбора оптимальных методов контроля концентрации и распределения частиц сажи по размерам необходимо проанализировать их возможные диапазоны варьирования. Размеры этих частиц в выбросах судовых энергетических установок варьируются от 0,1 до 100 мкм. Основная доля приходится на диапазон размеров частиц от 0,2 до 5,0 мкм [9]. В этой работе представлены предельно допустимые удельные значения выбросов сажи от судовой энергетической установки, которая может составлять не более 0,54 г/(кВт·ч). В описываемых в статье экспериментах эмиссия твердых частиц составляла от 0,139 до 0,188 г/(кВт·ч). Из представленных в [9] данных находим, что концентрация твердых

частиц в выбросах судовых энергетических установок составляло от 23 до 31 мг/м³. При этом предельное нормативное значение составляет 66 мг/м³.

В работах [10–14] рассматриваются лазерные методы измерения концентрации и функции распределения частиц по размерам, образование которых происходит в процессе механической активации (измельчение) различных материалов, таких как цемент, известь, гипс и другие. Принцип измерения обусловлен взаимодействием электромагнитного излучения с частицами, в результате чего происходит ослабление и рассеяние этого излучения. Характеристики ослабления и рассеяния электромагнитных волн зависят от физико-химических и оптических свойств частиц. В области возможных диапазонов варьирования размеров частиц сажи актуальным является видимая и ближняя ИК-область электромагнитных волн. Решая обратную задачу ослабления и рассеяния света частицами, мы можем получить информацию о концентрации и функции распределения частиц по размерам.

В работах [10, 12] описаны в основном результате исследования лазерными методами концентрации и функции распределения цементных частиц в потоке. Диапазон размеров этих частиц лежит в области от 0,1 до 100 мкм и более. Средним геометрическим параметром, характеризующим удельную поверхность частиц, является средний объёмно-поверхностный диаметр частиц d_{32} или диаметр Заутэра. Это диаметр, который будут иметь монодисперсные частицы, совокупная площадь поверхности которых равна общей поверхности всех полидисперсных частиц, занимающих одинаковый объём. Именно он, в первую очередь, характеризует распределение частиц по размерам. При этом в различных технологических переделах значение d_{32} лежит преимущественно в области от 0,3 до 4,5 мкм. Концентрация таких частиц составляет единицы – десятки мг/м³ в выбросах в атмосферу и до десятков г/м³ в потоках между технологическими переделами.

Из сравнения представленных выше размеров и концентрации частиц сажи в выбросах судовых дизелей и частиц, получаемых в процессе механической активации видно, что их области варьирования перекрываются. Отсюда можно сделать вывод о возможности измерения концентрации и дисперсности частиц сажи в судовых выбросах лазерными методами. В работах [10, 12] рассмотрены лазерные методы измерения в потоках концентрации и дисперсности полученных в результате измельчения частиц. В основе этих методов лежит теория рассеяния Ми [15]. При этом эффективным и достаточно надёжно реализуемым является модифицированный метод спектральной прозрачности или метод дифференциального ослабления.

Суть метода заключается в одновременном зондировании исследуемых частиц в воздушном потоке лазерным излучением на нескольких длинах волн. При этом длины волн подбираются таким образом, что ослабление излучения частицами происходит неодинаково и определяется соотношением геометрических размеров частиц с учётом их показателя преломления и длины волны. Дифференциальное ослабление лазерного излучения и несёт в себе полезную информацию.

Метод дифференциального ослабления основан на решении обратной задачи [10, 11], которое можно представить в виде уравнения:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\pi \cdot C_n \cdot l}{4} \cdot \int_0^{\infty} x^2 \cdot Q(x, \lambda, m) \cdot f(x) dx, \quad (1)$$

где τ_{λ} – оптическая плотность; C_n – счетная концентрация частиц; λ – длина волны зондирующего излучения; Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц; l – оптическая длина зондирования; x – диаметр частиц; m – комплексный показатель преломления материала частиц.

Усредненный фактор эффективности ослабления вычисляется по формуле:

$$Q(x, \lambda, m) = \frac{\int_0^{\infty} x^2 \cdot Q(x, \lambda, m) \cdot f(x) dx}{\int_0^{\infty} x^2 \cdot f(x) dx}. \quad (2)$$

Массовая концентрация взвешенных частиц через счетную концентрацию выражается формулой:

$$C_m = C_n \frac{\pi \cdot \rho_p}{6} \cdot \int_0^{\infty} x^3 \cdot f(x) dx. \quad (3)$$

При замене в уравнении (1) счетной концентрации на массовую концентрацию получается выражение:

$$\tau_{\lambda} = \frac{1,5 C_m \cdot l \cdot Q(x, \lambda, m)}{\rho_p \cdot d_{32}}, \quad (4)$$

где ρ_p – плотность материала частиц.

Экспериментально измеренная оптическая плотность и рассчитанное значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц позволяют рассчитать массовую концентрацию по формуле:

$$C_m = \frac{\tau_{\lambda i} \cdot \rho_p \cdot d_{32}}{1,5 l \cdot Q(x, \lambda, m)}. \quad (5)$$

Физическая модель метода основана на взаимодействии монохроматического излучения с полидисперсной средой по теории Ми [12] и сохранения инвариантности усредненного фактора эффективности ослабления относительно вида функции распределения частиц по размерам [13].

Средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных потоков определяется путем измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усредненных факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [13]:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{Q(x, \lambda_i, m)}{Q(x, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}). \quad (6)$$

Диапазон измерений средних размеров частиц определяется длинами волн зондирующего излучения.

Скорость аэрозольного потока может задаваться и поддерживаться в пределах от 5 до 20 м/с. В этом же диапазоне скоростей варьируются скорости отработавших газов в судовом энергетическом оборудовании. Меньшие скорости влекут за собой отложения конденсата, твердых частиц в выхлопной системе, большие скорости приводят к чрезмерному увеличению аэродинамического сопротивления всего тракта. В экспериментах обычно задавалась средняя скорость в районе 12 м/с.

В лазерных методах зондирования аэрозольных частиц в потоках влияющими на измеряемые величины параметрами частиц являются их геометрические размеры и форма и комплексный показатель преломления материала частиц на выбранных длинах волн лазерного зондирования. Сам по себе химический состав непосредственного влияния на измеряемые величины не оказывает. В первом приближении частицы считаются сферическими и однородными. Комплексный показатель преломления аморфного углерода, из которого состоят частицы сажи в диапазоне длин волн от 0,3 до 13 мкм хорошо приближенно описываются эмпирическими формулами, взятыми из источника: «Блох А.Г. Теплообмен излучения в котельных установках. Л.: Энергия, 1967. 326 с.».

Метрологические оценки и сравнительные испытания на экспериментальной установке были в полном объеме ранее выполнены для цементных аэрозольных частиц. Полученные результаты показали, во-первых, возможность лазерных измерений средних размеров и концентрации частиц и, во-вторых, достаточную для практических задач точность

измерения концентрации и средних размеров частиц. Так как измеряемые величины при лазерном зондировании определяются, как сказано выше, только геометрическими размерами и формой, а также комплексным показателем преломления материала частиц на выбранных длинах волн лазерного зондирования, получаемые результаты можно считать адекватными и для измерения аэрозольных потоков с частицами сажи, а также частиц другой природы с известными значениями показателя преломления на выбираемых длинах волн.

Описание установки

Рассмотрим устройство разработанной системы [12].

Оптическая схема лазерной системы представлена на рис. 1.

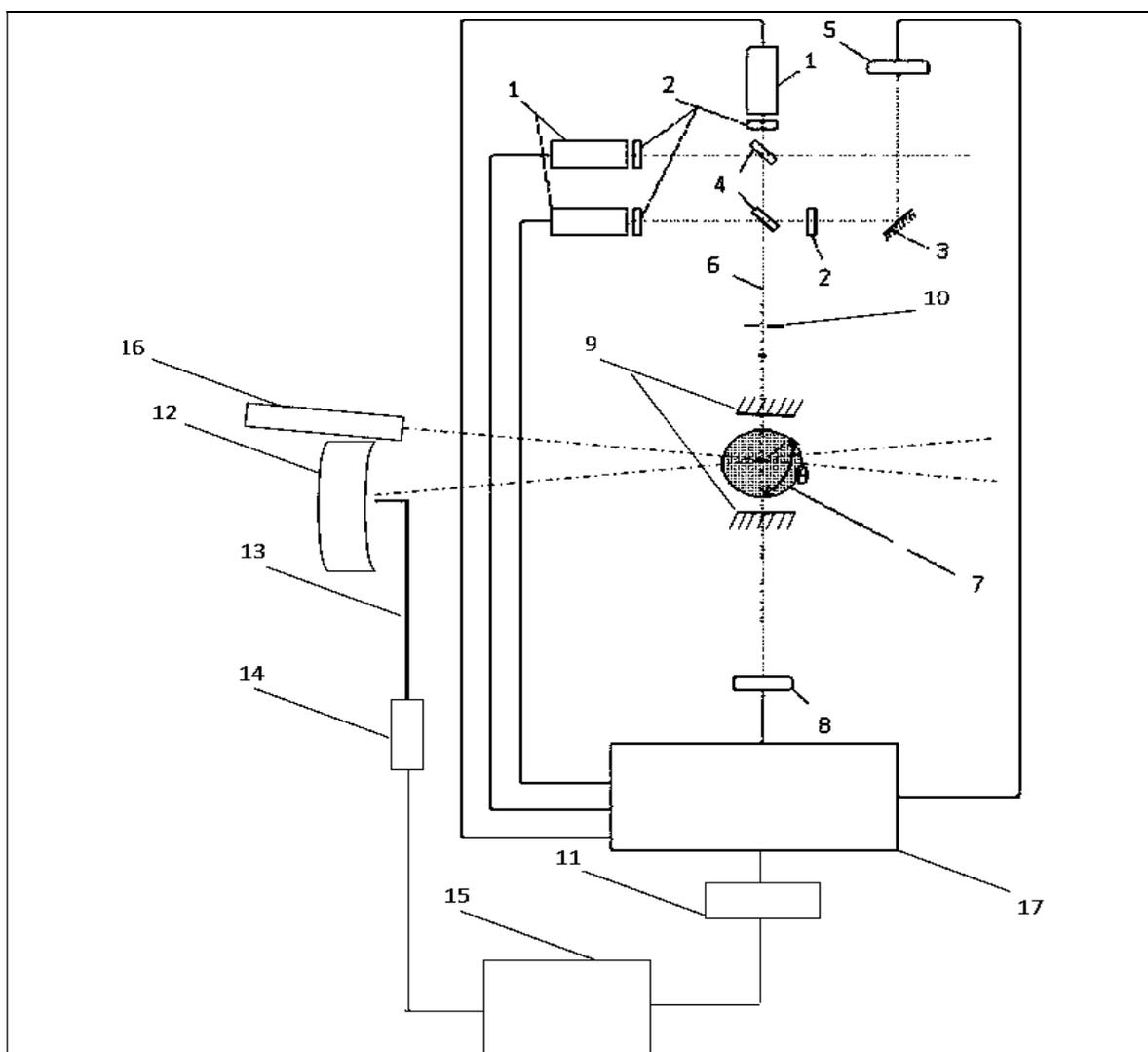


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: 1 – лазеры на длинах волн 650, 1064, 405 нм; 2 – светофильтры; 3 – зеркало; 4 – светоделительные стекла; 5 – опорный фотоприемник; 6 – лазерный пучок; 7 – аэрозольный поток; 8 – фотоприемник МСП; 9 – система зеркал; 10 – пластинка с отверстием; 11 – АЦП; 12 – телескоп; 13 – световод; 14 – спектрометр; 15 – ПК; 16 – лазер на длине волны 532 нм; 17 – блок формирования, регистрации и обработки сигнала

Сгенерированные последовательности импульсов излучения проходят через светоделительные пластины 4. Часть прошедшего через светоделители 4 излучения, отразившись от зеркала 3, поступает на опорный фотоприемник, а часть излучения, поступая на систему зеркал 9, проходит сквозь аэрозольный поток 7. Перед системой зеркал 9 установлена диафрагма, предназначенная для отсекающих лучей, возникающих в результате многократного отражения при прохождении лучами светоделительных стекол 4 и отражении от зеркала 3. Система зеркал 9 представляет собой два установленных параллельно друг относительно друга зеркала.

Многократное отражение лазерных лучей от параллельно расположенных зеркал позволяет увеличить оптический путь проходимый лучами и таким образом увеличить ослабление лазерного излучения регистрируемого фотоприемником ослабленного излучения 8. Зеркала в описываемой лазерной системе установлены под углом, обеспечивающим прохождение лучами девяти проходов сквозь аэрозольный поток. Проходящее сквозь аэрозольный поток излучение ослабляется и поступает на фотоприёмник 8.

Зарегистрированное фотоприёмником 8 излучение проходит через дифференциальный усилитель и синхронный детектор, после чего повторно усиливается дифференциальным усилителем. Электрический сигнал со второго дифференциального усилителя поступает на АЦП, где преобразуется в цифровой сигнал и далее поступает на обработку в ПК.

Сигналы лазерной системы поступают на блок обработки сигналов, с которого, проходя через аналогово-цифровой преобразователь, передаются на ПК. Блок обработки сигналов использует шесть каналов аналогово-цифрового преобразователя. Лазер 16 генерирует излучение на длине волны 532 нм. Попадающее в измерительный объем излучение, рассеянное рассеявшись в аэрозольном потоке, попадает в телескоп 12, отраженные в фокус телескопа лучи попадают на вход световода 13. Попадающее на вход световода 13 излучение передается на спектрометр 14, где преобразовывается в цифровой сигнал и по отдельному от сигналов ослабления каналу поступает на обработку в ПК 15.

Таким образом, разработана четырех волновая лазерная система, которая позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения методом дифференциального ослабления на трех длинах волн и сигнал рассеяния Ми на частицах аэрозоля излучения четвертого лазера.

По измеренным сигналам ослабления рассчитаем средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц. Средний объемно-поверхностный диаметр можно определить, исходя из зависимости усредненного фактора эффективности ослабления от среднего объемно-поверхностного диаметра [13].

Кривые зависимости усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра представлены на рис. 3.

По известным зависимостям усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра построены показанные на рис. 4 кривые зависимости отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра.

Исходя из [13], рассчитанные кривые зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн применимы для отношения оптических плотностей на двух длинах волн.

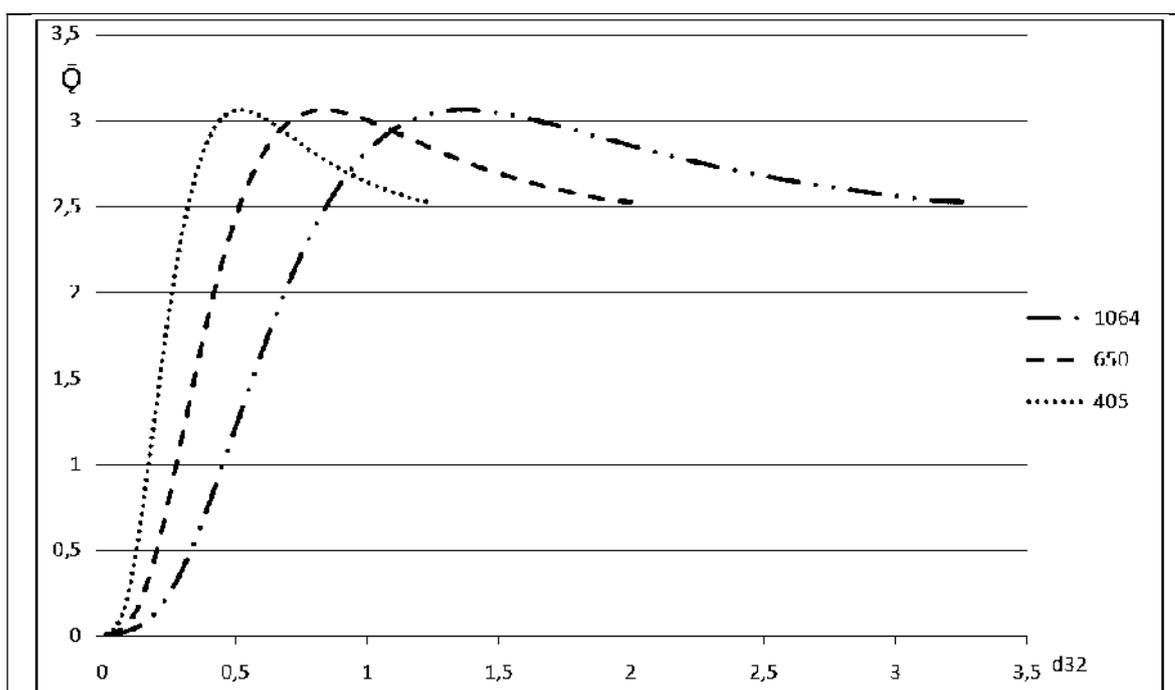


Рис. 3. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от усредненных факторов эффективности

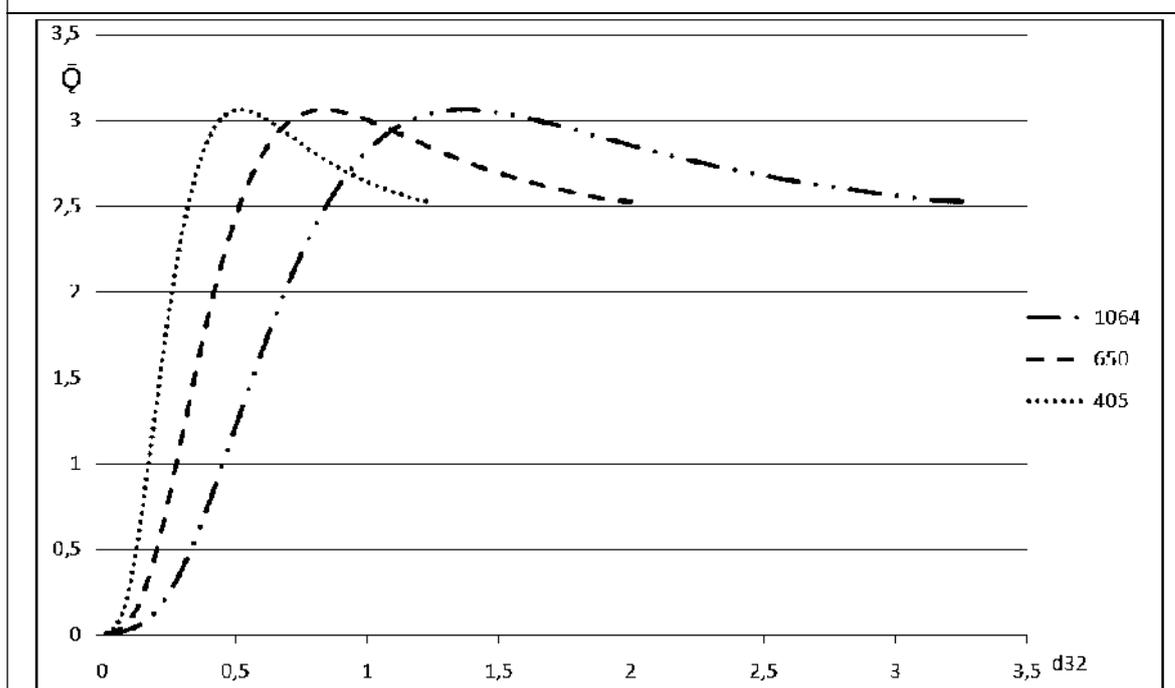


Рис. 4. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн

Выбор длин волн лазерного зондирования осуществляется исходя из возможного диапазона варьирования d_{32} частиц сажи. Область варьирования этого диапазона должна перекрываться областью, в которой наблюдается монотонный рост отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн с увеличением d_{32} . Как видно из рис. 4, использование длин волн лазерного излучения от 405 до 1064 нм позволяет

измерять d_{32} в области размеров от 0,2 до 1,2 мкм. В настоящее время появилась возможность расширения этого диапазона до 5 и более мкм за счёт применение многоволнового лазера на парах стронция, одновременно генерирующего несколько длин волн в диапазоне от 1030 до 6450 нм. Для рассчитанных оптических плотностей на трех длинах волн были найдены отношения:

$$\frac{\tau_{\lambda_{650}}}{\tau_{\lambda_{405}}}, \frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{405}}}, \frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{650}}}$$

По построенным кривым зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн были определены значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для каждого рассчитанного отношения оптических плотностей на двух длинах волн. Для каждой серии измерений было рассчитано среднее значение среднего объемно-поверхностного диаметра измеренного на трех длинах волн. Для полученных средних значений d_{32} каждой серии было рассчитано среднее значение, которое составило $d_{32} = 0,61$ мкм. В результате были измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн на разработанной лазерной установке в составе экспериментального стенда. Измеренные сигналы ослабления лазерного излучения позволяют рассчитать значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц.

Как было ранее отмечено, непосредственно после своего образования частицы сажи начинают коагулировать (укрупняться) с течением времени, как до выхода отработавших газов в выхлопную систему, так и в ней самой. Поэтому в дальнейшем, в зависимости от решаемой задачи, результаты измерения будут зависеть от места установки лазерного измерителя. В непосредственной близости от входа в выхлопную систему, размеры и концентрация частиц сажи будет иметь большую информативность для решения вопросов диагностирования судового энергетического оборудования. Ближе к выходу из выхлопной системы, значения концентрации и размеров частиц будут иметь в большей степени экологическую информативность. Ценность данной работы, в первую очередь, представляет обоснование принципиальной возможности измерения аэрозольных потоков на выходе из энергетического оборудования лазерными методами для решения, как экологических задач, так и задач, связанных с эксплуатационными характеристиками элементов судовых энергетических установок.

Заключение

1. Установлено, что размеры частиц сажи, которые сорбируют в себе токсичные компоненты отработавших газов, в выбросах судовых энергетических установок варьируются от 0,1 до 100 мкм. В области возможных диапазонов варьирования размеров частиц сажи актуальным является видимая и ближняя ИК-область электромагнитных волн. Решая обратную задачу ослабления и рассеяния света частицами можно получить информацию о концентрации и функции распределения частиц по размерам.
2. Выполнен анализ возможности одновременной оценки концентрации и дисперсности лазерным методом дифференциального ослабления и описан вариант его технической реализации.
3. Разработана четырех волновая лазерная система, которая позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения методом дифференциального ослабления на трех длинах волн и сигнал рассеяния Ми на частицах аэрозоля излучения четвертого лазера. По измеренным сигналам ослабления рассчитан средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц.

4. Измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн на разработанной лазерной установке в составе экспериментального стенда, что позволяет рассчитать значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц.
5. Показано, что в зависимости от диапазона размеров частиц сажи выбираются соответствующие длины волн лазерного зондирования.
6. Применение метода дифференциального ослабления лазерного излучения частицами сажи в выбросах судовых энергетических установок на нескольких длинах волн позволяет оценивать одновременно их концентрацию и характеристики дисперсности. При этом длины волн лазерного излучения выбираются из возможного диапазона варьирования среднего объемно-поверхностного диаметра частиц.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Turkin V. A., Cherbachi Yu. V., Shemanin V. G., Dzhioev R. I. Lidar monitoring of nitrogen and sulphur oxides molecules in ship power installation emissions. Computer simulation // [IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 872, 1st International Conference on "Marine Geology and Engineering" 10-11 September 2021, Novorossiysk, Russian Federation](#).
2. Chu-Van T., Ristovski Z., Pourkhesalian A. M., Rainey T., Garaniya V., Abbassi R. [et al.] A comparison of particulate matter and gaseous emission factors from two large cargo vessels during manoeuvring conditions // *Energy Reports*. 2019. Vol. 5. P. 1390–1398.
3. Anderson M., Salo K., Hallquist E. M., Fridell E. Characterization of particles from a marine engine operating at low loads // *Atmospheric Environment*. 2015. 101. P. 65–71.
4. Mueller L., Jakobi G., Czech H., Stengel B., Orasche J., Arteaga-Salas J. M. [et al.] Characteristics and temporal evolution of particulate emissions from a ship diesel engine // *Applied Energy*. 2015. Vol. 155. P. 204–217.
5. Winnes H., Moldanova J., Anderson M., Fridell E. On-board measurements of particle emissions from marine engines using fuels with different sulphur content // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2016. Vol. 230, P. 45–54.
6. Corbett J. J., Winebrake J. J., Green E. H., Kasibhatla P., Eyring V., Lauer A. Mortality from ship emissions: A global assessment // *Environmental Science and Technology*. 2007. 41. P. 8512–8518.
7. Туркин В. А., Игнатенко Г. В., Сарычев И. А., Джиоев Р. И. Лазерный дистанционный мониторинг выбросов вредных веществ судовыми энергетическими установками // *Морские интеллектуальные технологии*. 2021. № 2(52). Т. 4. С. 58–66.
8. Руднев Б. И., Повалихина О. В. 2014 Оптические параметры частиц сажи и характеристики радиационного теплообмена в камере сгорания дизеля // *Вестник ТОГУ*. 2014. № 2(33). С. 133–140.
9. Шикина А. Ю., Туркин В. А. Снижение выбросов твердых частиц с отработавшими газами судового двигателя изменением угла наклона топливных струй // *Эксплуатация водного транспорта*. 2016. № 1(78). С. 86–90.

10. Веденин Е. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аэрозольных выбросов // *Безопасность в техносфере*. 2014. № 5(50). С. 25–31.
11. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
12. Половченко С. В., Привалов В. Е., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Восстановление функции распределения частиц по размерам на основе данных многоволнового лазерного зондирования // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 5. С. 43–49.
13. Архипов В. А. и др. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. № 1. С. 48–52.
14. Веденин Е. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аварийных выбросов промышленных аэрозолей в атмосферу // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56. № 8/3. С. 278 – 280.
15. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 644 с.

Laser remote monitoring of soot emissions from ship power equipment

¹ Turkin V. A., ² Sarychev I. A., ² Chartiy P. V., ¹ Pismenskaya Yu. V., ¹ Dzhioev R. I.

¹ 353918, Russia, Novorossiysk, Lenin Ave. 39, State Maritime University named after Admiral F. F. Ushakov

² 353900, Russia, Novorossiysk, Karl Marx st. 20,
Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of Kuban State Technological University

When fuel is burned in a marine engine, soot particles are formed that absorb the toxic components of the exhaust gases. The sizes of these particles range from 0.1 to 100 microns. In the range of possible ranges of variation in the size of soot particles, the visible and near-IR regions of electromagnetic waves are relevant. By solving the inverse problem of attenuation and scattering of light by particles, one can obtain information about the concentration and distribution function of particles by size. The analysis of the possibility of simultaneous assessment of the concentration and dispersion by the laser method of differential attenuation is performed and a variant of its technical implementation is described. A four-wave laser system has been developed, which makes it possible to measure the attenuation signals of laser radiation by the differential attenuation method at three wavelengths and the Mie scattering signal on aerosol particles of the radiation of the fourth laser. The measured attenuation signals were used to calculate the average volumetric surface diameter of aerosol particles. The signals of the attenuation of laser radiation at three wavelengths were measured on a developed laser setup as part of an experimental stand, which makes it possible to calculate the values of the mass concentration and the average volume-surface diameter of aerosol particles. It is shown that, depending on the range of size of soot particles, the corresponding laser sounding wavelengths are chosen. The application of the method of differential attenuation of laser radiation by soot particles in the emissions of ship power plants at several wavelengths allows one to evaluate simultaneously their concentration and dispersion characteristics.

Key words: Ship power plants, exhaust gases, particle size of soot, laser method.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_16

УДК 535.8

ГРНТИ 29.01.45 29.31.27

Обучение техническому творчеству и работе на лазерном станке с ЧПУ подростков в системе дополнительного образования

Афонин О. Ю., Орлов М. Ю., Ульянов И. В., * Степанов В. А.

390000, Россия, Рязань, ул. Свободы 46,
РГУ им. С. А. Есенина

e-mail: vl.stepanov@365.rsu.edu.ru

Данная статья посвящается обучению техническому творчеству и работе на лазерных станках с ЧПУ подростков в системе дополнительного образования. Описываются: структура и оптическая схема лазерного станка с ЧПУ, система охлаждения и поддува, порядок включения и эксплуатации, последовательность изготовления изделий. Приводится дополнительная общеразвивающая программа обучения.

Ключевые слова: лазерный станок, числовое программное управление, обучение, оптическая схема, ЧПУ, подростки, дополнительное образование, 3D-проектирование, жилой дом, мэрия, кольцевая дорога, строительство, мост.

Введение

Дополнительное образование играет важную роль при формировании у детей представлений о современных профессиях. Являясь частью системы непрерывного образования, оно дает расширенное представление об изучаемых предметах. Техническая (технологическая) направленность занимает важное место в дополнительном образовании. Обучающиеся после прохождения образовательных программ овладевают начальными или расширенными навыками работ в различных областях техники, что во многом формирует их направление, развитие и самореализацию обучаемых в профессии.

1. Лазерный станок с числовым программным управлением (ЧПУ)

В данной работе использовался лазерный станок с числовым программным управлением (ЧПУ) марки Wattsan 0503 (рис.1), использующий в качестве источника излучения – CO₂ лазер с мощностью излучения до 150 Вт на длине волны 10,6 мк и лазерной трубкой, образованной стеклянным прямоточным газоразрядным активным элементом с внутренними зеркалами, охлаждаемый водой с замкнутой системой охлаждения. Система охлаждения активного элемента является важнейшим для обеспечения работоспособности и продуктивности лазерного станка системой, работающей при помощи чиллера. Принцип охлаждения состоит в конверсии воды из сосуда с терморегулятором, при помощи встроенного компрессора, через внешнюю оболочку активной среды и возвращения жидкости обратно в сосуд (рис.2).



Рис. 1. Внешний вид лазерного станка Wattsan 0503

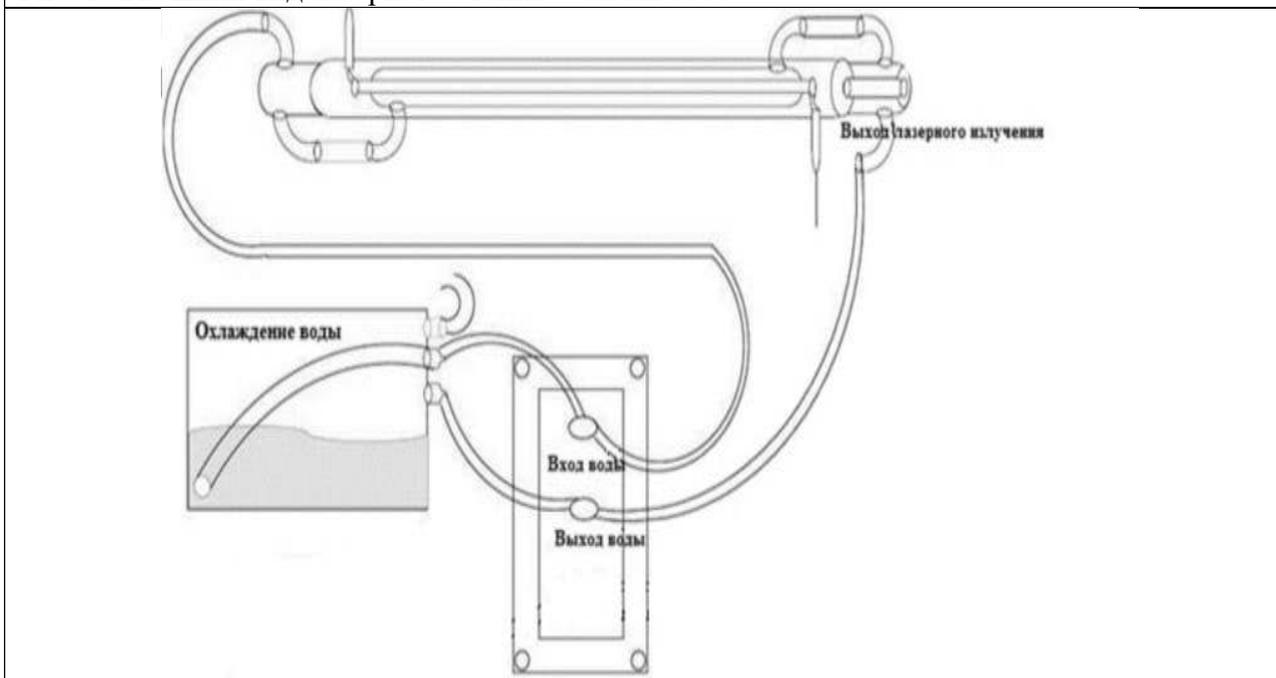


Рис. 2. Схема охлаждения активной среды лазерного станка с числовым программным управлением

Оптическая схема лазерного станка (рис.3) включает в себя лазерную трубку, электрическое питание ее, три поворотных зеркала, находящихся в одной плоскости с лазерной трубкой и фокусирующую головку. Лазерный станок состоит из пяти основных частей: механическая система, оптическая система, привод, система управления, дополнительные принадлежности. Механическая часть станка включает раму, рельсовую направляющую держателей, крышку. Привод состоит из трех линейных направляющих, ремня, двухшаговых двигателей и нескольких шестерней. Дополнительные принадлежности: воздушный компрессор, чиллер, вытяжной вентилятор.

Система управления лазерным станком основывается на контроллере. Управляющая программа изделия генерируется на компьютере, затем сигнал подается на управляющую DSP плату и распределяется на шаговые двигатели, отвечающие за перемещение

Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Том № 01. № 03 (03)
<https://lasers-measurement-information.ru>

лазерной головки и блок поджига, который подает напряжение на газоразрядную трубку и поджигает ее и генерирует лазерный пучок ИК излучения.

Взаимодействие лазерного излучения с обрабатываемым материалом сопровождается интенсивной подачей воздуха (рис. 4). Давление создается при помощи компрессора. Проходя вдоль газоразрядной трубки, воздух выходит из сопла фокусирующей головки. Он служит для улучшения (управления) качеством реза. Под давлением воздуха сокращается вероятность возгорания обрабатываемого материала и степень его копчения.

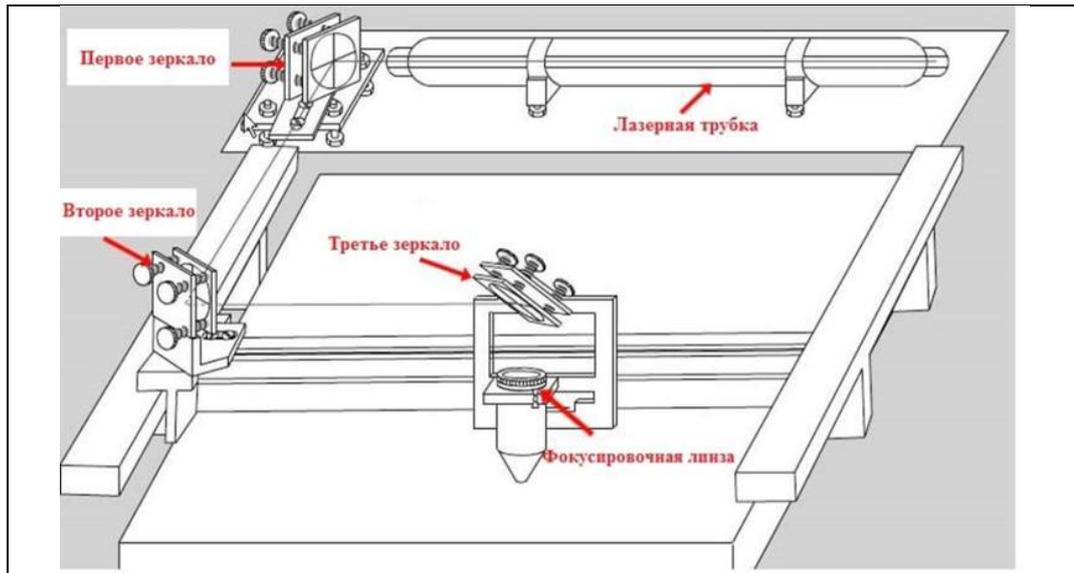


Рис. 3. Оптическая схема лазерного станка

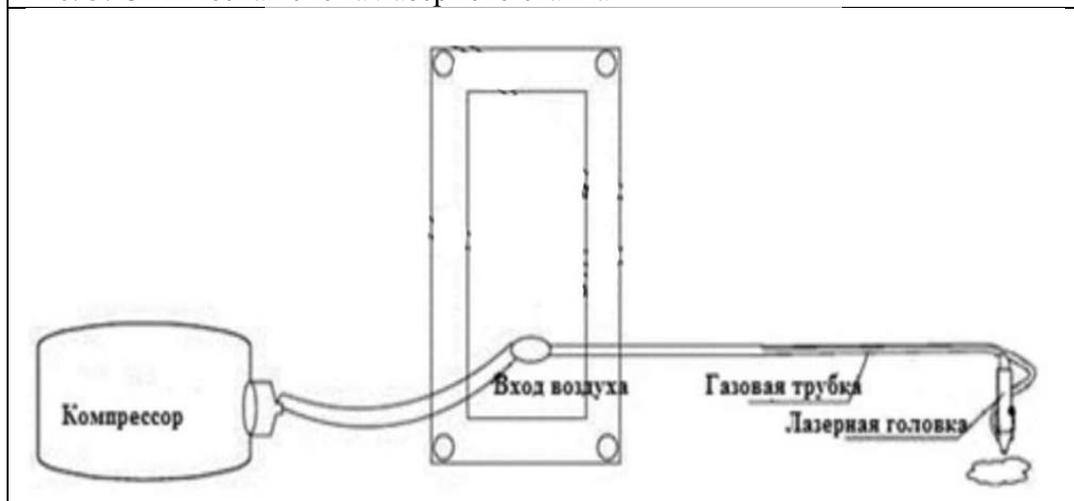


Рис. 4. Схема обдува обрабатываемого материала

2. Правила использования и охрана труда для лазерного станка с ЧПУ

А. Охрана труда при работе с лазерным станком с ЧПУ подразделяется на 4 составляющих:

- перед началом работы,
- во время работы,
- в аварийных ситуациях,
- после окончания работ.

Перед началом работы необходимо:

- выполнить осмотр оборудования и подготовить защитную одежду и инструменты;
- привести рабочее место в соответствие все расходные материалы, готовые изделия и отходы разместить в специально расположенном месте;
- перед запуском лазерного станка проверить наличие и целостность защитных кожухов, подвижных элементов, заземления оборудования, системы охлаждения, системы аспирации и крепежных устройств;
- проверить исправность управляющих систем охлаждения.

Во время работы необходимо:

- Постоянно находиться в защитной одежде.
- Устанавливать заготовки после первичной чистки от поверхностных загрязнений.
- Выполнять установку и смену режущего инструмента после полной остановки станка.
- Для заготовок, превышающих рабочее поле фрезера устанавливать защитные ограждения и обозначения.
- Своевременно проверять чистоту режущих инструментов от деревянной стружки.
- Ограничить нахождение или передачу объектов в непосредственном контакте с обрабатываемым механизмом.
- Извлекать готовое изделие после полной остановки и отключения оборудования.

При аварийной ситуации необходимо:

- При возгорании использовать огнетушитель, песок, землю или накрыть брезентом. Использование воды запрещено при подключенном электроснабжении оборудования.
- При отключении освещения дождаться подключения, не передвигаясь по неосвещенным участкам помещения.
- При наличии признаков обратиться в медпункт.

По окончанию работ необходимо:

- выключить оборудование, привести в порядок рабочее место.

Б. Дополнительные требования работы с лазерным источником излучения. «Лазерное излучение VBG 93» содержит ряд рекомендаций, основные из которых заключаются в следующем:

- Перед началом эксплуатации лазерных устройств 3 В и 4 В (мощность излучения более 0,5 Вт, длина волны излучения выше 315 нм) должен быть назначен ответственный за технику безопасности.
- Должны быть четко определены опасные зоны лазерного излучения. При работе с лазерным 3 В и 4 В подступы к таким зонам должны быть обозначены таблицами или сигнальными лампами, а сами зоны соответствующим образом отражены.
- Находиться в зоне лазерного излучения разрешается только в специальных защитных очках.
- Лица, находящиеся в зоне лазерного излучения, должны быть проинструктированы касательно правил поведения и соответствующих мер защиты. Должны быть приняты необходимые меры по предотвращению пожара или взрыва в результате лазерного излучения.

Работа с лазерным станком с ЧПУ начинается с его подготовки. Проверяется уровень воды в чиллере и осуществляется его запуск. Выдерживается температурный режим охлаждения. Допустимой является температура: от 5 до 25°C. После проверки уровня воды проводится проверка целостности газоразрядной трубки. Визуально осматривается внешний вид и целостность всех элементов и узлов лазерного станка, включая качество

оптических элементов и водяного охлаждения активного элемента (рис.3). Проверяется настройка и чистота оптической системы (рис.2).

3. Методика обучения подростков в системе дополнительного образования.

Для разработки методики обучения подростков по программе «Дополнительное образование работе на лазерных станках с ЧПУ «используется опыт реализации проектов «город знаний» (проектирование помещений мэрии ,жилые дома, мосты) и программы «Деревообработка на лазерных станках с ЧПУ». Подростки выполняют практическую составляющую, изготовление макетов помещений мэрии и жилых домов; на их основе построена образовательная программа двухнедельной смены.

Обучение состоит из 4 стадий:

- разработка макетов построек и растений,
- подготовка управляющих программ,
- изготовление оснований,
- изготовление построек на лазерном станке.

Начальная стадия обучения одаренных детей и подростков заключается в получении навыков по проектированию 2D и 3D объектов. Обучающиеся изучают базовые определения: чертеж, эскиз и модель.

Для обучения применяется программное обеспечение CorelDraw для изучения векторного дизайна и создания макетов для работы на лазерном станке с ЧПУ и Компас-3D, используемые для создания объемных моделей.

Этап проектирования построек макета города реализуется с помощью программы CorelDraw. Для выполнения построек обучающиеся первоначально изучают панель инструментов. Поэтапно дети применяют следующие инструменты:

- Инструмент выбора – позволяет изменять положение или преобразовывать объекты,
- Инструмент создания форм позволяет редактировать линию или символ текста с помощью изменения положения узлов,
- Обрезка – служит для удаления объектов за пределами выделенного участка,
- Нож – используется для создания из единого объекта двух отдельных с зазором или перекрытием,
- Удаление виртуального сегмента – позволяет удалить накрадывающиеся сегменты в объектах,
- Масштаб – служит для изменения масштабов объектов в окне программы,
- Панорама – используется для демонстрации скрытых участков рабочего поля без изменения масштаба,
- Свободная форма – позволяет выполнять сегменты кривых и прямых,
- Двухточечная линия – используется для создания прямой в начале одной точки и в конце другой,
- Кривая Безье – применяется для создания объектов по одному сегменту,
- Перо – позволяет создавать кривые сегментами с предварительным просмотром,
- В-сплайн – используется для построения кривых по управляющим точкам, без деления на отдельные сегменты,
- Ломаная линия – применяется для рисования кривых линий без прерывания,
- Художественное оформление – позволяет добавлять кисти, спрей и каллиграфические эффекты с помощью специальных мазков,

- Прямоугольник – используется для создания прямоугольников и квадратов путем перемещения в рабочем поле,
- Эллипс – служит для рисования окружностей и эллипсов,
- Многоугольник – используется для создания многоугольников различной формы,
- Звезда – применяется для создания различной сложности звезд,
- Спираль – позволяет создавать простые и логарифмические объекты,
- Стандартные фигуры – используется для создания различных объектов представленных в библиотеке фигур,
- Текст – позволяет добавлять параграф или изменять фигурный текст,
- Размер – позволяет производить измерение характеристик объекта.

Основными объектами, проектируемыми для макета города, стали: мэрия, центральная автодорога, жилые многоэтажные дома, жилые деревенские дома, мосты, церковь и мельницы (электроветряки) (рис. 5, 6).

Макет мэрии представляет собой комплексный макет, состоящий из огромного перечня составных элементов. Общая высота готового изделия составила 1,52 метра. Нижняя часть главного здания представляет собой две восьмиугольных призмы, стоящих друг на друге. Основание призм выполнялось при помощи операции «многоугольник». Пазы создавались операцией «прямоугольник» Боковые части призм выполнялись с помощью операций «прямоугольник», «эллипс», «двухточечная линия» и «скругление» (рис. 5).

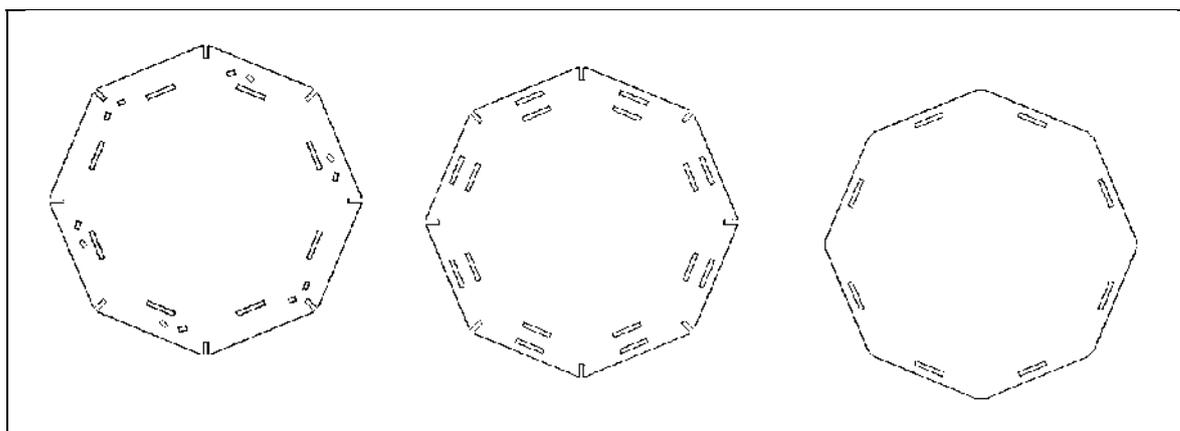


Рис. 5. Основания призмы и боковой части мэрии с пазовыми элементами

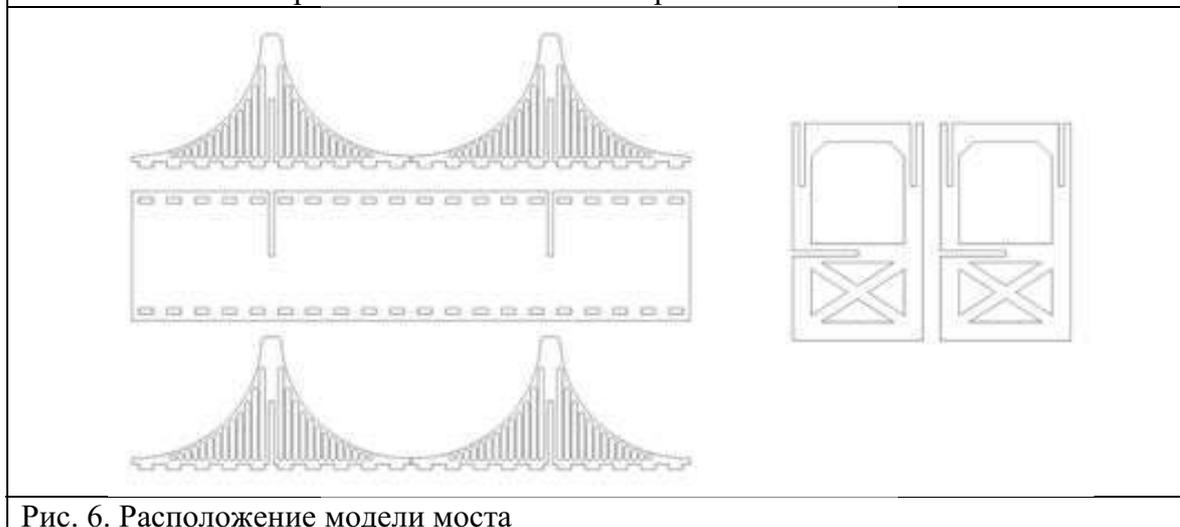


Рис. 6. Расположение модели моста

Заключение

В статье представлены возможности используемого лазерного станка с ЧПУ при обработке материалов; правила и техника безопасности при работе на нем детей и подростков. Описана методика обучения подростков работе на лазерном станке с ЧПУ в системе дополнительного образования

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Е. Н. Моос, М. Ю. Орлов, В. А. Степанов, Е. Е. Харитоновна. Технология использования станков с ЧПУ в системе дополнительного образования / Материалы II Всерос. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве», РГУ им. С. А. Есенина, 2020 г., с. 61–64.
2. М. Ю. Орлов, Д. А. Навитанюк, В. А. Степанов, Э. Г. Сидорова, Е. Е. Харитоновна / Обучение техническому творчеству подростков, находящихся в трудной жизненной ситуации, в системе дополнительного образования / Материалы 3 Всер. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы физики и технологии в образовании науке и производстве», РГУ имени С. А. Есенина, 2021 г., с. 101–104.

Teaching technical creativity and working on a laser machine with numerical control for adolescents in the system of additional education

Afonin O. Yu., Orlov M. Yu., Ulyanov I. V., Stepanov V. A.

*390000, Russia, Ryazan, st. Freedom 46,
Russian State University named after S. A. Yesenin*

This article is devoted to teaching technical creativity and work on numerical control (NC) laser machines for teenagers in the system of additional education. The following are described: the structure and optical scheme of a NC laser machine, the cooling and blowing system, the procedure for switching on and operating, the sequence of manufacturing products. An additional training program is presented.

Key words: laser machine, numerical control, training, optical scheme, NC, teenagers, additional education, 3D design, residential building, City Hall, ring road, construction, bridge.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_23

УДК 504.064.37

ВАК 05.11.13

ГРНТИ 87.15.15, 87.17.15

Обработка сигналов лидара дифференциального ослабления лазерного излучения в аэрозольном потоке

Веденин Е. И., Половченко С. В., * Сарычев И. А., Чартий П. В.

353900, Россия, Новороссийск, ул. Карла Маркса 20,
Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ

e-mail: svetokdojdei@mail.ru

Контроль параметров аэрозольных частиц в выбросах промышленного производства, таких как массовая концентрация и дисперсный состав частиц, является актуальной задачей. Наиболее подходящими для контроля таких параметров в реальном времени являются лазерные методы решения обратной задачи. Целью работы является описание метода расчета массовой концентрации и параметра, позволяющего определять дисперсный состав частиц – среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, путем обработки сигналов ослабления лазерного излучения. С этой целью были разработаны устройство многоволновой лазерной системы на основе метода дифференциального ослабления лазерного излучения и пылевой стенд, создающий поток аэрозольных частиц, схожий по параметрам с потоком частиц на выходе пылегазоочистного оборудования реального производства. Была произведена серия измерений сигналов ослабления лазерного излучения на трех разных длинах волн с помощью лазерной системы на разработанном стенде. По измеренным сигналам ослабления были рассчитаны значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, оценены относительные погрешности значений рассчитанных параметров.

Ключевые слова: лазерное зондирование, массовая концентрация, средний объемно-поверхностный диаметр, аэрозольные частицы.

Введение

Контроль параметров аэрозольных частиц, поступающих в атмосферный воздух в составе выбросов промышленного производства, является актуальной задачей. Среди наиболее информативных параметров аэрозольных частиц, позволяющих определить возникновение, источник, характер и генезис загрязнения, являются массовая концентрация и средний объемно-поверхностный диаметр частиц, позволяющий восстанавливать функцию распределения аэрозольных частиц по размерам [1–4]. При этом наиболее подходящими для контроля указанных параметров аэрозольных частиц в реальном времени являются лазерные методы решения обратной задачи [1, 2]. Среди методов решения обратной задачи наибольшими преимуществами для контроля указанных параметров обладает метод дифференциального ослабления лазерного

излучения. Среди этих преимуществ: техническая реализация и юстировка систем отличается относительной простотой, возможность зондирования высокотемпературных аэрозольных потоков большой оптической плотности, малая чувствительность к вибрациям. Целью работы является описание метода расчета массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц путем обработки сигналов ослабления лазерного излучения.

Устройство экспериментальной лазерной системы

Для решения задачи восстановления функции распределения аэрозольных частиц по размерам и измерения их концентрации разработана экспериментальная лазерная система на основе метода дифференциального ослабления [5–7]. Рассмотрим оптическую схему такой лазерной системы, представленную на рис. 1.

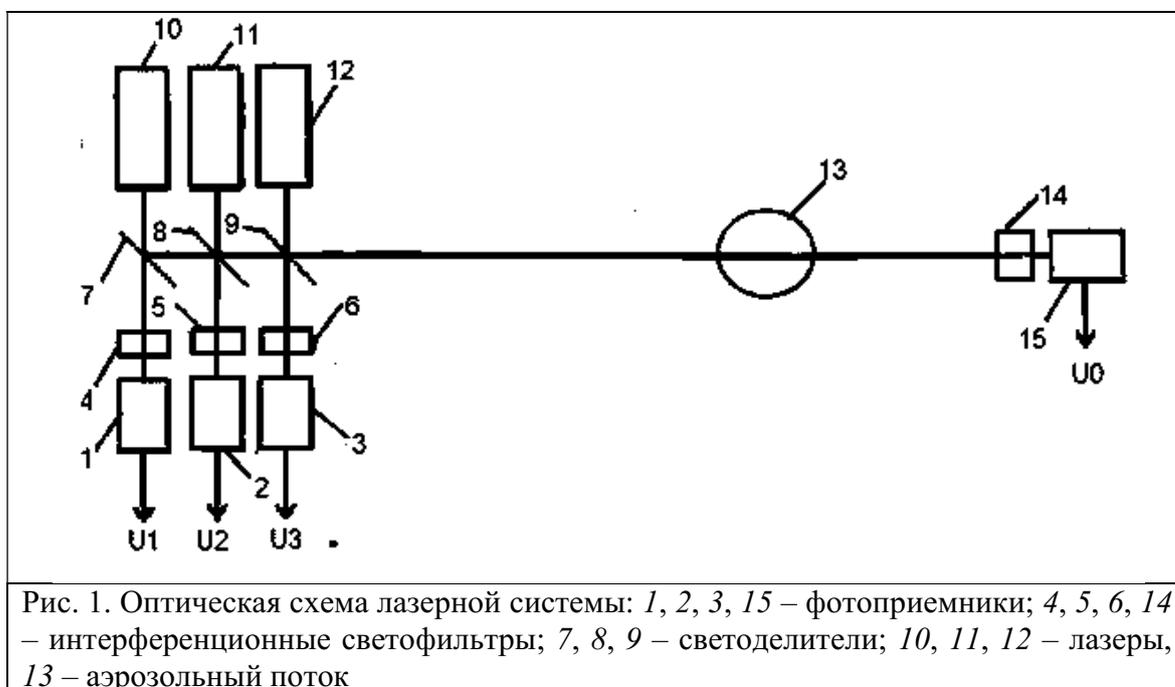


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: 1, 2, 3, 15 – фотоприемники; 4, 5, 6, 14 – интерференционные светофильтры; 7, 8, 9 – светоделители; 10, 11, 12 – лазеры, 13 – аэрозольный поток

Через поток аэрозоля 13, сформированный на выходе газохода и проходящий перпендикулярно лазерному лучу, пропускались три луча лазеров 10, 11 и 12 с длинами волн 405, 650 и 1064 нм, которые в схеме дифференциального ослабления направлялись на один фотоприемник 15 со своей схемой обработки сигнала. Измеренные сигналы ослабления позволяют рассчитать средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Сигналы с выходов фотоприемников U_0 , U_1 , U_2 , U_3 регистрировались системой сбора данных, работающей на линии с ПК. В экспериментальной лазерной системе для определения только концентрации аэрозоля в качестве излучателя 12 использовалась вторая гармоника YAG-Nd лазера, работающий на длине волны 532 нм в непрерывном режиме с мощностью до 0,2 т.

Последовательности импульсов лазерного излучения проходят через светоделительные пластины 7, 8 и 9. Часть прошедшего через светоделители 7, 8 и 9 излучения поступает на опорные фотоприемники 1, 2 и 3, а основная часть излучения проходит сквозь аэрозольный поток 13.

Для экспериментального исследования зависимости сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц методами дифференциального ослабления разработан экспериментальный генератор частиц цементного аэрозоля. Воздушный поток цементных частиц схожий по своим свойствам с потоками реального производства поступает в измерительный объем V перпендикулярно лазерному лучу. Изменение параметров сгенерированных аэрозольных потоков, позволяет исследовать зависимости лазерных сигналов от этих параметров.

Экспериментальное исследование сигналов ослабления

Экспериментальное исследование зависимости сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц на разработанном экспериментальном стенде осуществляется посредством лазерного зондирования аэрозольных потоков в реальном времени с одновременной записью сигналов ослабления и последующей обработкой записанных сигналов.

Измерение сигнала ослабления осуществляется в течении 9 минут.

Рассмотрим алгоритм проведения измерений. В интервале времени от 0 до 60 секунд осуществляется «нулевое» измерение. На этом этапе нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка отключены, аэрозольный поток отсутствует. В интервале времени от 60 до 120 секунд включается нагнетатель воздуха, создающий воздушный поток, питатель цементного порошка отключен. Аэрозольный поток на данном этапе отсутствует, однако в воздушный поток попадает некоторое количество цементного порошка, высыпавшееся при размещении питателя в отверстии трубки Вентури, что выражается в залповом выбросе частиц при включении питателя. В интервале времени от 120 до 420 секунд включены нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка. На данном этапе через измерительный объем лазерной установки проходит аэрозольный поток. Из-за спрессовывания цементного порошка поступление аэрозольного потока в измерительный объем лазерной установки происходит не в момент включения питателя (120 с), а через некоторое время. Устойчивый аэрозольный поток формируется в интервале – от 180 до 200 секунд и продолжается до 380...400 секунд.

В промежутке от 420 до 480 секунд питатель отключен, нагнетатель воздуха включен. На данном этапе аэрозольный поток отсутствует, генерируется только воздушный поток, в который может попадать некоторое количество цементного порошка, оставшееся на стенках газохода после пропускания через него цементной пробы. В интервале времени от 480 до 540 секунд осуществляется «нулевое» измерение. На данном этапе нагнетатель воздуха и питатель цементного порошка отключены, аэрозольный поток отсутствует (рис. 2).

По полученным графикам (рисунок 2) видно, что на участке «холостого» измерения от 0 до 60 секунд величина сигнала остается неизменной. При включении нагнетателя воздуха (60 секунд) за счет залпового выброса аэрозольных частиц цемента происходит резкое кратковременное ослабление сигнала, которое продолжатся от 15 до 20 секунд. После возвращения величины сигнала к первоначальному значению на большей части участка от 75...80 до 160...165 секунд сигнал остается неизменным, отмечаются отдельные кратковременные ослабления сигнала (от нескольких до 20 секунд) связанные с попаданием в воздушный поток некоторого количества цементного порошка выдуваемого из открытой части шприца питателя. На участке от 160...165 до 370...375 секунд отмечается непрерывное ослабление сигнала в результате формирования устойчивого аэрозольного потока. Сигнал ослабления возрастает по модулю, что связано со спрессовыванием цементного порошка в шприце питателя, в результате чего

концентрация частиц в нижней части шприца питателя выше, чем в верхней. На участке от 370...375 секунд до 540 секунд сигнал остается неизменным и равным по модулю сигналу на участке от 0 до 60 секунд, что связано с отсутствием аэрозольного потока на данном участке.

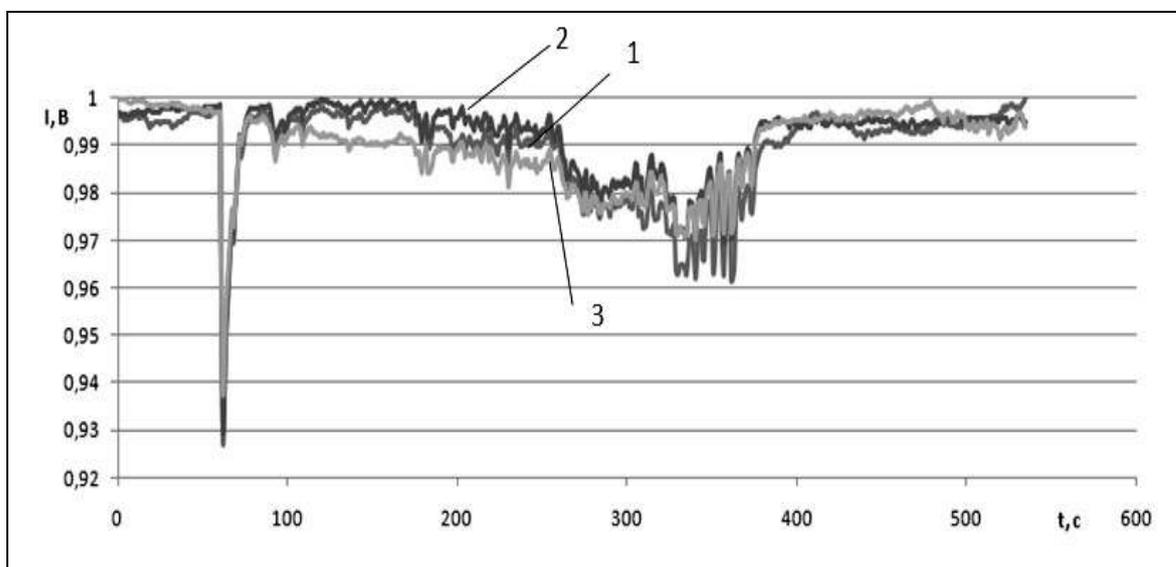


Рис. 2. График зависимости экспериментально измеренных сигналов ослабления, приведенных к максимуму, от времени измерения (после приведения к первоначальному значению нулевого сигнала): 1 – 650 нм; 2 – 1064 нм; 3 – 405 нм

Оценим возможность расчета массовой концентрации по измеренным сигналам ослабления, исходя из закона Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 e^{-kc}$$

где I – интенсивность ослабленного излучения; I_0 – интенсивность падающего излучения; k – коэффициент ослабления; c – массовая концентрация, $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$; l – оптическая длина зондирования, м. Отсюда массовая концентрация определяется по формуле:

$$c = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{kl}$$

Для расчета концентрации по измеренным сигналам ослабления рассчитаем коэффициенты ослабления для каждой длины волны. Из последней формулы, при умножении обеих частей на объемный расход (V) получаем, равенство

$$kclV = V \ln \frac{I_0}{I},$$

интегрируя которое, имеем

$$\int_{t_1}^{t_2} kclV dt = V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt,$$

где τ – оптическая плотность.

Исходя из того, что масса вещества определяется по формуле

$$m = V \int_{t_1}^{t_2} c dt, \quad (1)$$

получаем

$$k = \frac{V \int_{t_1}^{t_2} \tau dt}{ml}. \quad (2)$$

Измеренная оптическая длина зондирования составила $l = 493$ мм.

Масса цементного порошка выдавливаемого в ходе экспериментального измерения ($V_{\text{пор.}} = 0,6$ мл) составляет $m = 0,51$ г.

Для измерения $\int_{t_1}^{t_2} \tau dt$ были вычислены и проинтегрированы значения $\ln \frac{I_0}{I}$ в интервале времени от $t_1 = 120$ секунд (время включения питателя) до $t_2 = 420$ секунд (время выключения питателя). В качестве I_0 бралось среднее арифметическое значений измеренного сигнала в интервале времени от 0 до 60 секунд («холостое» измерение).

Среднее рассчитанное по (2) значение коэффициента ослабления для сигнала на длине волны 650 нм составило $k_k = 0,174$, для сигнала на длине волны 405 нм составило $k_\phi = 0,250$, для сигнала на длине волны 1064 нм составило $k_{\text{ин}} = 0,137$.

Согласно рис. 2 массовая концентрация имеет непостоянное во времени значение. Для оценки достоверности измеряемых значений массовой концентрации рассчитывается масса пробы, являющаяся интегральной характеристикой массовой концентрации частиц по времени при постоянном расходе воздуха. По рассчитанным средним значениям коэффициента ослабления по формуле (1) рассчитаем массу пробы для каждой серии измерения, включающей измерение сигналов ослабления на трех длинах волн одной пробы цементного порошка ($V_{\text{пор.}} = 0,6$ мл). Рассчитанные массы для длины волны 650 нм составили значения от 0,491 до 0,551 г ($m_{\text{ср}} = 0,51$ г), для длины волны 405 нм – от 0,480 до 0,542 г ($m_{\text{ср}} = 0,51$ г), для длины волны 1064 нм – от 0,489 до 0,594 г ($m_{\text{ср}} = 0,51$ г).

По измеренным сигналам ослабления рассчитаем средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Средний объемно-поверхностный диаметр частиц можно определить, исходя из зависимости усредненного фактора эффективности ослабления от среднего объемно-поверхностного диаметра [8]. Кривые зависимости усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, представлены на рис. 3.

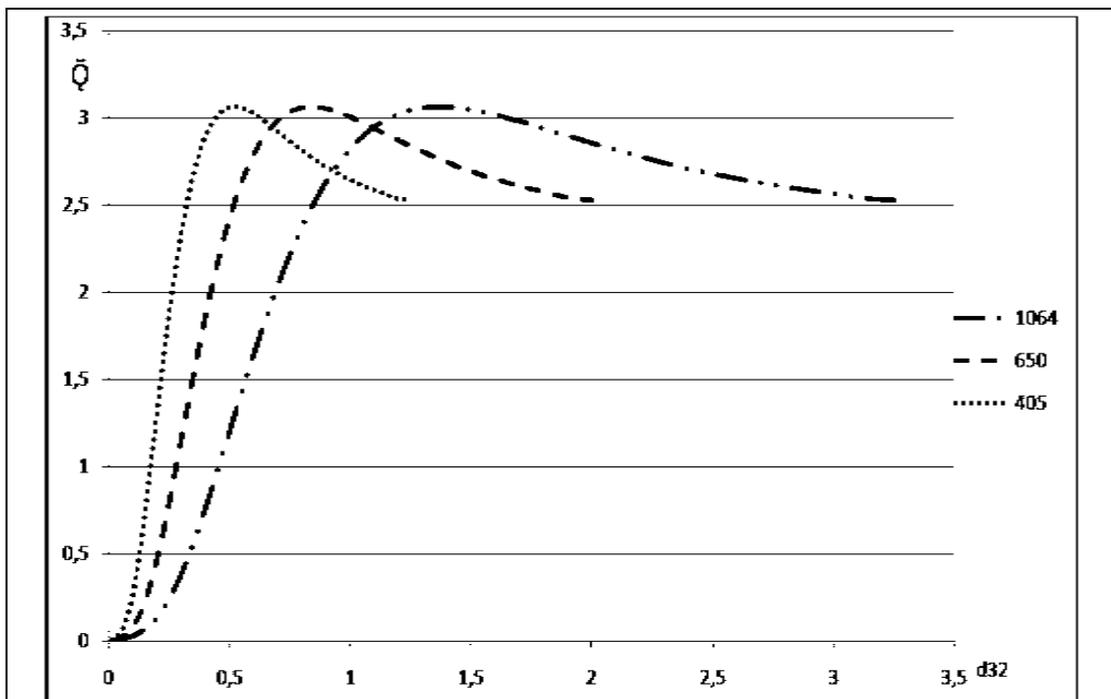


Рис. 3. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от усредненных факторов эффективности

По известным зависимостям усредненного фактора эффективности ослабления на трех длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц построены кривые зависимости отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра (рис. 4).

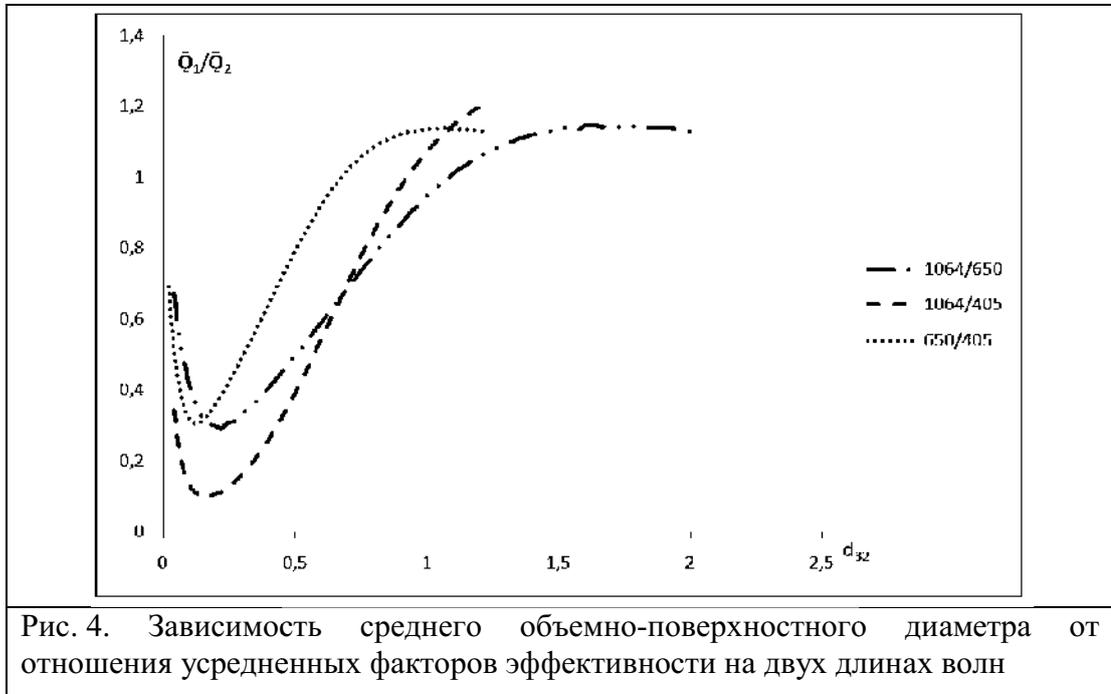


Рис. 4. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн

Средний объемно-поверхностный диаметр частиц аэрозольных потоков определяется путем измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усредненных факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [9]:

$$\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}} = \frac{\bar{Q}(d, \lambda_i, m)}{\bar{Q}(d, \lambda_j, m)} = F_{ij}(d_{32}), \quad (3)$$

где λ – длина волны зондирующего излучения; Q – фактор эффективности ослабления для одиночных частиц; d – диаметр частиц; m – комплексный показатель преломления материала частиц.

Рассчитанные, исходя из формулы (3), кривые зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн применимы для отношения оптических плотностей на двух длинах волн.

Для рассчитанных оптических плотностей на трех длинах волн были найдены отношения $\frac{\tau_{\lambda_{650}}}{\tau_{\lambda_{405}}}$, $\frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{405}}}$, $\frac{\tau_{\lambda_{1064}}}{\tau_{\lambda_{650}}}$. По построенным кривым зависимости среднего объемно-поверхностного диаметра частиц от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн были определены значения среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для каждого рассчитанного отношения оптических плотностей на двух длинах волн. Для каждой серии измерений было рассчитано среднее значение среднего объемно-поверхностного диаметра частиц, измеренного на трех длинах волн. Для полученных

средних значений d_{32} каждой серии было рассчитано среднее значение, которое составило $d_{32} = 0,61$ мкм.

Таким образом, были измерены сигналы ослабления лазерного излучения на трех длинах волн на разработанной лазерной установке в составе экспериментального стенда. Измеренные сигналы ослабления лазерного излучения позволяют рассчитать значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента.

Расчет погрешностей измерений

Рассчитаем погрешность проведенных на экспериментальном стенде измерений среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации.

В эксперименте используются пробы цемента одинакового объема ($V_{\text{пор.}} = 0,6$ мл), при этом значения масс проб, использованных в разных сериях измерений, могут колебаться в определенных пределах. Оценим погрешность определения массы используемых проб цемента.

Для оценки погрешности определения массы проб были последовательно измерены массы восемнадцати проб цемента объемом 0,6 мл. Для исключения влияния массы шприца, в который набирались пробы, все пробы последовательно засыпались и удалялись из одного и того же шприца.

Масса пробы определялась по формуле:

$$m_{\text{пр.}} = m - m_0,$$

где m – масса шприца наполненного цементом, г; m_0 – масса чистого шприца, определяемая каждый раз после удаления предыдущей измеренной пробы, г. По рассчитанным для каждого взвешивания массам пробы было вычислено среднее значение массы пробы для всех взвешиваний

$$\bar{m}_{\text{пр.}} = \frac{\sum m_{\text{пр.}}}{n} = 0,51 \text{ г,}$$

где n – число измерений.

Среднеквадратическое отклонение результата проведенного ряда из 18 измерений составит

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum (m_{\text{пр.}} - \bar{m}_{\text{пр.}})^2}{n - 1}} = 0,016 \text{ г.}$$

Граница доверительного интервала проведенных измерений составит:

$$\Delta m = t \cdot S_m = 0,034 \text{ г,}$$

где t – табличное значение функции Стьюдента (для доверительной вероятности $P = 0,95$ и 18 измерений $t = 2,11$).

Относительная погрешность определения массы используемых в измерениях проб цемента составит [10]:

$$\delta = \frac{\Delta m}{\bar{m}_{\text{пр.}}} \cdot 100\% = 6,7 \%. \quad (4)$$

Из проведенных расчетов относительная погрешность определения массы пробы цемента составляет 6,7 %, что не может существенно повлиять на рассчитанные параметры.

Рассчитаем относительные погрешности рассчитанных значений массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц. Относительная погрешность измеренных значений среднего объемно-поверхностного диаметра на каждой длине волны для разных серий измерений и всех рассчитанных значений среднего объемно-поверхностного диаметра рассчитывалась последовательно по формуле (4).

Относительная погрешность всех рассчитанных значений средних объемно-поверхностных диаметров на трех длинах волн составила 11,4 %. Исходя из формулы (1) относительная погрешность массовой концентрации частиц равна относительной погрешности рассчитанной массы цементного порошка. Относительная погрешность измеренных значений массы на каждой длине волны для разных серий измерений и всех рассчитанных значений массы рассчитывалась последовательно по формуле (4). Относительная погрешность всех рассчитанных значений масс на трех длинах волн составила 13,4 %.

Таким образом, относительные погрешности рассчитанных по экспериментально измеренным сигналам ослабления значений среднего объемно-поверхностного диаметра и массовой концентрации аэрозольных частиц цемента являются допустимыми.

Заключение

Разработанная многоволновая лазерная система на основе метода дифференциального ослабления позволяет измерять сигналы ослабления лазерного излучения. Измерение ослабления сигналов лазерного излучения позволяет рассчитывать массовую концентрацию и средний объемно-поверхностный диаметр в реальном времени. Относительная погрешность рассчитанных таким образом значений массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц является допустимой. Развитый в работе полуэмпирический подход дает новые перспективы для решения обратной задачи лазерного зондирования аэрозоля [11, 12].

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ, проект 19-42-230004 и проект 19-45-230009.

Список литературы

1. Веденин Е. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аварийных выбросов промышленных аэрозолей в атмосферу // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8/3. С. 278–280.
2. Chartiy P. V., Privalov V. E. Shemanin V. G. Nano- and micropowder laser multy wavelengths sensing and aerodynamics classifications // Key Engineering Materials. 2010. V. 437. P. 571–574.
3. Веденин Е. И., Дьяченко В. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерный контроль среднего объемно-поверхностного диаметра частиц для оценки параметров аэрозольного загрязнения атмосферы // Безопасность в техносфере. 2017. № 6(69) ноябрь–декабрь. С.3–11.

4. Веденин Е. И., Половченко С. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. Изменение функции распределения частиц по размерам при различных режимах работы пылеулавливающего оборудования // *Безопасность в техносфере*. 2016. № 1(58). С. 41–47.
5. Веденин Е. И. Экспериментальная установка для измерения параметров цементного аэрозоля // *Материалы конференции ВНКСФ-22*. (г. Ростов-на-Дону, 21–28 апреля 2016 г.). г. Ростов-на-Дону, 2016. С. 269–271.
6. Привалов В. Е., Рыбалко А. В., Чартий П. В., Шеманин В. Г. О влиянии шума и вибрации цементного оборудования на работу лазерного измерителя концентрации частиц // *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77, вып. 3. С. 62–65.
7. Privalov V. E., Chartii P. V., Shemanin V. G. Optical properties of the polydisperse aerosols in air flows at their pulse generation studies // *Proc. SPIE*. 2004. V. 5447. P. 251–259.
8. Polovchenko S. V., Privalov V. E., Chartii P. V., Shemanin V. G. Reconstructing the distribution function of particles over sizes based on the data of multiwave laser probing // *Journal of Optical Technology*. 2016. V. 83, Issue 5. P. 300–304. <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000300>
9. Архипов В. А., Ахмадеев И. Р., Бондарчук С. С., Ворожцов Б. И., Павленко А. А., Потапов М. Г. Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 1. С. 48–52.
10. Лютиков И. В., Фомин А. Н., Леусенко В. А. / Под общ. ред. Д. С. Викторова. *Метрология и радиоизмерения: – Красноярск: СФУ, 2016. – 508 с.: ISBN 978-5-7638-3477-2. – [Электронный ресурс]. URL: <https://znanium.com/catalog/product/967405> (дата обращения: 05.11.2021)*
11. Qing Yan, Huige Di, Jing Zhao, Xiaonan Wen, Yufeng Wang, Yuehui Song, Dengxin Hua. Improved algorithm of aerosol particle size distribution based on remote sensing data // *Applied Optics*. 2019. V. 58. No. 12. P. 8075–8082.
12. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Измерение мощности упругого рассеянии атмосферного аэрозоля реальным лидаром // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 19–21.

Lidar signals processing for the laser radiation differential extinction in the aerosol flow

Vedenin E. I., Polovchenko S. V., Sarychev I. A., Chartiy P. V.

353900, Russia, Novorossiysk, Karl Marx st. 20,

Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of Kuban State Technological University

Aerosol particles parameters in industrial production emissions control, such as mass concentration and dispersed particles composition, is actual task. The most suitable to control this parameters in real time are laser methods to decision reverse task. This work purpose is mass concentration and parameter, which allow to determine dispersed particles composition – volume-surface particles diameter count method description by the way of laser radiation attenuation signals processing. To this purpose have been developed multi-wave laser system arrangement based on laser radiation differential attenuation method and dust stand, which create aerosol particles flow similar by parameters with particles flow at the real production dust and gas cleaning equipment exit. Have been produced series measurements laser radiation signals attenuation on three different wave lengths by laser system on developed stand. According to the measured attenuation signals have been counted mass concentration and volume-surface particles diameter values, calculated parameters values relative errors are estimated.

Key words: laser sensing, mass concentration, volume-surface diameter, aerosol particles.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_32

УДК 535.8

ГРНТИ 29.31.27

Автоматизированное 3D проектирование активного элемента газоразрядного ионного аргонового лазера

* Степанов В. А., Овчинникова Е. В., Серебряков А. О.

390000, Россия, Рязань, ул. Свободы 46,
РГУ им. С. А. Есенина

e-mail: vl.stepanov@365.rsu.edu.ru

Работа посвящена автоматизированному проектированию активного элемента газоразрядного ионного аргонового лазера с использованием программного комплекса Компас-3D. Представлены: чертеж разрядного капилляра с окнами под углом Брюстера и системой охлаждения, 3D модели баллонов катодного узла и рубашки охлаждения, анодной металлокерамической части капилляра, обводного канала и элементов крепления катодного узла.

Ключевые слова: газоразрядный лазер, аргон, программный комплекс, трехмерное моделирование, активный элемент, капилляр, катодный узел, система охлаждения, обратный инжиниринг, угол Брюстера.

Введение

Решение задач совершенствования организации производства на основе «цифровизации» процессов жизненного цикла производимой продукции и предоставляемых услуг является одним из актуальных направлений и отвечает современным тенденциям, ориентированным на повышение конкурентоспособности производимой продукции/услуг или производственных систем за счет сокращения времени разработки и внедрения в серийное производство выпускаемой нового поколения продукции. Успешность решения данных задач во много зависит от непрерывного создания, внедрения, применения, накопления и трансфера новых знаний, наукоемких технологий и инновационных подходов, позволяющих выстраивать принципиально новые технологические цепочки с последующим построением на их основе «умных» или «цифровых» производств. Одной из центральных наукоемких технологий является компьютерный инжиниринг, имеющий надотраслевой характер, и в рамках которого принято выделять следующие приоритетные тенденции:

- 1) интеграция компьютерных систем предназначенных для решения задач конструкторского и технологического с последующей ориентацией на станки с ЧПУ и аддитивные технологии;
- 2) В настоящее время САПР используется на многих предприятиях и проектных организациях, позволяя улучшить детализацию конструкции, вывести ее на новый

уровень. При этом повышаются темпы и качество проектирования, более эффективно выполняются сложные инженерные расчеты.

В настоящее время САПР используется на многих предприятиях и проектных организациях, позволяя улучшить детализацию конструкции, вывести ее на новый уровень. При этом повышаются темпы и качество проектирования, более эффективно выполняются сложные инженерные расчеты.

КОМПАС-График 5.9 (ОАО «Аскон»). Редактор параметрического чертежа и дизайна ориентирован на выпуск конструкторской и технологической сборки. Одна из сильных сторон КОМПАС-График является полная поддержка ЕСКД. КОМПАС-График имеет ряд дополнительных библиотек, в том числе: системы для спецификации проектирования, машиностроительного библиотека, библиотека для проектирования тел вращения и т.д.

Особого внимания заслуживает программный комплекс КОМПАС-3D российской компании АСКОН. В настоящее время САПР КОМПАС широко применяется в машиностроении, приборостроении, строительстве и энергетике. Принципиальным отличием КОМПАС-3D является использование отечественного математического ядра и параметрических программ, разработанных специалистами АСКОН. АСКОН и НТЦ АПМ - российский лидер в области разработки систем конечно элементного анализа, совместными усилиями создавая программное обеспечение, позволяющее выполнять КОМПАС-График 5.9 (ОАО «Аскон»). Редактор параметрического чертежа и дизайна ориентирован на выпуск конструкторской и технологической сборки. Одна из сильных сторон КОМПАС-График является полная поддержка ЕСКД. КОМПАС-График имеет ряд дополнительных библиотек, в том числе: системы для спецификации проектирования, машиностроительного библиотека, библиотека для проектирования тел вращения и т.д.

В результате совместной работы, в среде КОМПАС-3D появилась САЕ библиотека, реализующая решения инженерных задач методом конечных элементов (МКЭ). Подготовка геометрической 3D-модели и задание материала осуществляется средствами системы КОМПАС-3D. С помощью АРМ FEM можно приложить нагрузки различных типов, указать граничные условия, создать, конечно, элементную сетку и выполнить расчет. При этом процедура генерации конечных элементов проводится автоматически.

Повышение эффективности и результативности современных производственных систем возможно за счет внедрения прогрессивных технологий, одной из которых является метод реверсивного (обратного) инжиниринга сложных изделий. Данный метод ориентирован на быстрое получение конечного результата – трехмерной модели и комплекта конструкторской документации на изделие, что позволяет значительно сократить сроки проектирования, модификации и ввода в производство проектируемого изделия. Интенсивное развитие информационно-коммуникационных технологий и их широкое внедрение на каждом этапе жизненного цикла производимой продукции позволяет находить комплексное решение поставленной научно-технической проблемы посредством использования соответствующего класса программного обеспечения.

В настоящее время в промышленном производстве широкое распространение нашли системы автоматизированного проектирования – CAD (Computer aided design) системы, позволяющие автоматизировать функции процесса проектирования изделия и создания комплекта рабочей документации, к которым относится Компас-3D – это программный комплекс, предназначенный для решения задач трехмерного моделирования. Данная система также используется для реализации метода реверсивного или обратного инжиниринга при проектировании изделий основного и вспомогательного производств в широких отраслях промышленности, машиностроении, приборостроении, авиастроении, судостроении, станкостроении, вакуумной, газоразрядной и квантовой электронике, металлургии, промышленно-гражданском строительстве, производстве товаров народного

потребления и т. д. Использование данной САД-системы позволяет оптимизировать и повысить эффективность труда при разработке проектной конструкторской документации.

Программный комплекс Компас-3D был использован для решения задачи моделирования активного элемента при создании источника когерентного излучения на основе газоразрядного ионного аргонового (криптонового) лазера. Чертежи основных частей активного элемента лазера представлены на рис. 1–6.

Активный элемент представляет собой двухэлектродную газоразрядную трубку. В трубке, наполненной аргоном(криптоном), реализуется сильноточный (более 150 а/см^2) дуговой разряд с прямонакальным катодом. В качестве разрядообразующего канала в конструкции использована керамическая цельнопаянная длинномерная трубка из окиси бериллия с внутренним диаметром 2,5 мм, обеспечивающим одномодовый режим работы лазера. Бериллиевая керамика через металлический переход соединяется со стеклянной трубкой, торец которой с двух сторон шлифуется под углом Брюстера. Торцы трубки герметизируются специальным вакуумнопрочным клеем и тонкой кварцевой пластинкой. Для отвода тепла выделяемого током разряда используется рубашка охлаждения.

Активный элемент охлаждается дистиллированной водой или хладагентом (дистиллят). Чертеж общего вида активного элемента представлен на рис. 1.

В процессе проектирования рассматриваемого устройства были разработаны 3D модели отдельных составных узлов активного элемента лазера. В дальнейшем полученные трехмерные модели использовались для создания рабочих чертежей основных частей рассматриваемого устройства и разработки технологии изготовления отдельных компонентов, а также для выполнения сборки всего активного элемента. На рис. 2–6 представлены чертежи узлов, полученные в результате создания 3D моделей методом обратного инжиниринга (размеры и обозначения убраны с целью соблюдения соглашения о неразглашении коммерческой тайны).

Ионные лазеры на инертных газах (аргоне и криптоне) относятся к разряду уникальных устройств для когерентного видимого непрерывного излучения в сине-зеленой и красной областях спектра с мощностью от нескольких милливатт до 50 ватт. Данный тип лазеров нашел свое применение там, где He-Ne- и He-Cd-лазеры оказались недостаточно мощными. Наибольший интерес представляет их использование в голографии при изготовлении художественных голограмм изделий самого профиля и в спектроскопии рассеянного света при изучении физических процессов наноструктур. Среди прочих областей применения можно выделить полиграфическую промышленность (для экспонирования, изготовления видео- и аудиодисков), высокоскоростные лазерные принтеры, опорное направление- система посадки самолетов и подводное телевидение, разнообразные лазерные шоу. Кроме того, ионный аргоновый лазер используется для накачки лазеров на красителях и титан-сапфировых лазерных систем. При этом – путем соответствующей синхронизации мод – могут генерироваться импульсы в пико- и фемтосекундном диапазонах. Непрерывно перестраиваемые (cw)-лазеры также подлежат накачке с применением аргоновых лазеров.

Представленные чертежи используются в производстве активного элемента газоразрядного ионного (аргонового и криптонового)лазеров фирмой ООО «ЛазерВариоРакурс». Прделана работа по восстановлению чертежей и технологии изготовления(восстановления) активных элементов аргонового и криптонового лазеров, применяемых в различных технологических и физических установках в России.

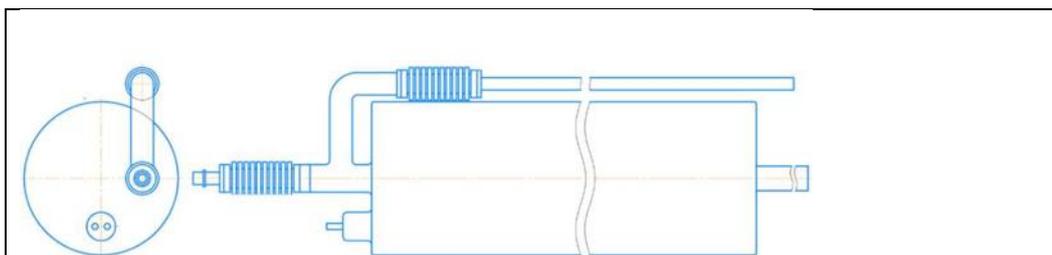


Рис. 2. Баллон катодного узла

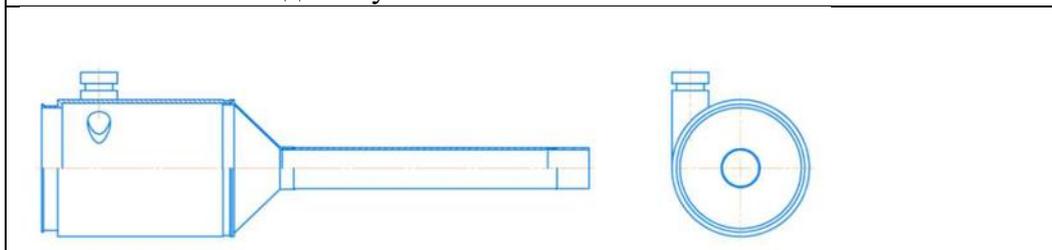


Рис. 3. Корпус рубашки охладителя

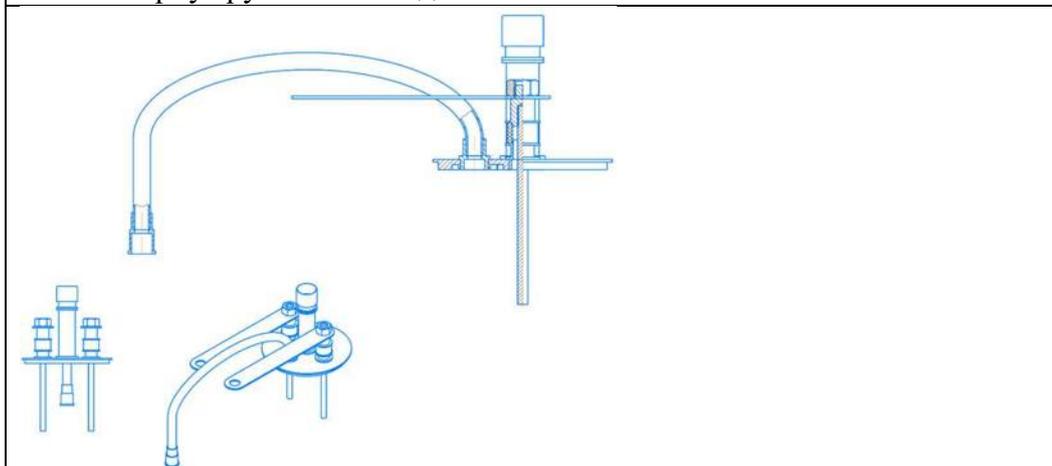


Рис. 4. Элементы и узлы катодного блока

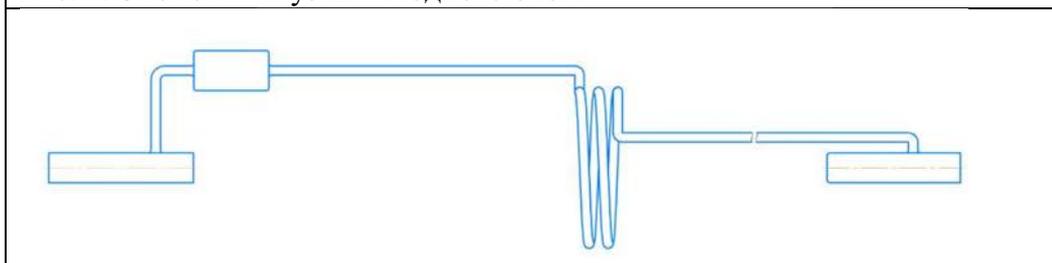


Рис. 5. Обводная трубка

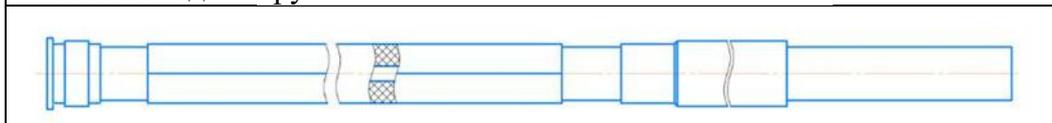


Рис. 6. Блок арматуры анодной металлокерамической части капилляра

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Е. В. Овчинникова, А. О. Серебряков Цифровая трансформация производства: перспективы и средства компьютерного инжиниринга // Материалы Всерос. науч.-метод. конф. Актуальные проблемы физики и технологии в образовании, науке и производстве: материалы II Всерос. науч.-практ. конф., 26–27 марта 2020 года / Рязанский государственный университет имени С. А. Есенина. – С. 92–94. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rsu.edu.ru/wp-content/uploads/2020/10/63239.pdf>
2. В. Ф. Быковский, С. И. Мольков, В. С. Хилов, С. И. Хилов, В. А. Степанов. Мощный источник когерентного излучения для оптической голографии и рамановской спектроскопии // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2013. – № 165. – С. 71–79.

Automated 3D design of an active element of a gas-discharge ion argon laser

Stepanov V. A., Ovchinnikova E. V., Serebryakov A. O.

*390000, Russia, Ryazan, st. Freedom 46,
Russian State University named after S. A. Yesenin*

The work is devoted to the computer-aided design of the active element of a gas-discharge ion argon laser using the Compass-3D software package. Presented are: a drawing of a discharge capillary with windows at a Brewster angle and a cooling system, 3D models of the balloons of the cathode assembly and cooling jacket, anode cermet part of the capillary, bypass channel and fastening elements of the cathode assembly.

Key words: gas-discharge laser, argon, software package, three-dimensional modeling, active element, capillary, cathode assembly, cooling system, reverse engineering, Brewster angle.

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_38
УДК 621.39, 530.182
ГРНТИ 49.29.14

Исследование особенностей формирования высокоскоростной последовательности оптических импульсов с перестройкой несущей частоты для ВОЛС со спектральным уплотнением каналов

Андреев Д. П.

*195251, Россия, г.Санкт-Петербург, ул.Политехническая 29,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

e-mail: andreev.dp@edu.spbstu.ru

Проанализирована возможность перестройки несущей частоты символьной последовательности сверхкоротких оптических импульсов за счет использования нелинейных свойств волоконного световода. Проведено численное моделирование этого процесса в программе OptiSystem. Подтверждена возможность смещения несущей частоты оптических импульсов для использования в ВОЛС со спектральным уплотнением каналов.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, волоконный световод, нелинейные эффекты.

Динамичное развитие волоконно-оптических систем передачи данных обусловлено их высокой информационной емкостью. Скорость передачи данных определяется двумя параметрами: количеством спектральных каналов и скоростью в каждом из них. Скорость передачи данных в отдельном спектральном канале зависит от длительности символьных импульсов. Поэтому чем короче символьные импульсы, тем выше скорость информационного потока при заданной скважности следования импульсов в символьной последовательности. Для достижения скоростей порядка десятков Гбит/с преимущество имеют импульсы пикосекундной и субпикосекундной длительности. Увеличение длины пролета предполагает использование символьных импульсов с высокой входной энергией. При малой длительности это означает высокую пиковую мощность импульсов. Сочетание высокой мощности и широкого спектра символьного импульса обуславливает проявление нелинейных эффектов в волоконном световоде. Нелинейные эффекты подразделяются на внутриканальные и межканальные (присущие только системам со спектральным уплотнением). Внутриканальные нелинейные эффекты могут использоваться для улучшения характеристик системы передачи данных, например, повышения ее информационной емкости. Так, нелинейная фазовая самомодуляция может компенсировать дисперсионное уширение символьного импульса. При точном равновесии указанных эффектов в волоконном световоде формируется оптический солитон – стабильный волновой пакет, способный передаваться на большие расстояния без искажений. Эффект комбинационного саморассеяния оптического импульса может быть

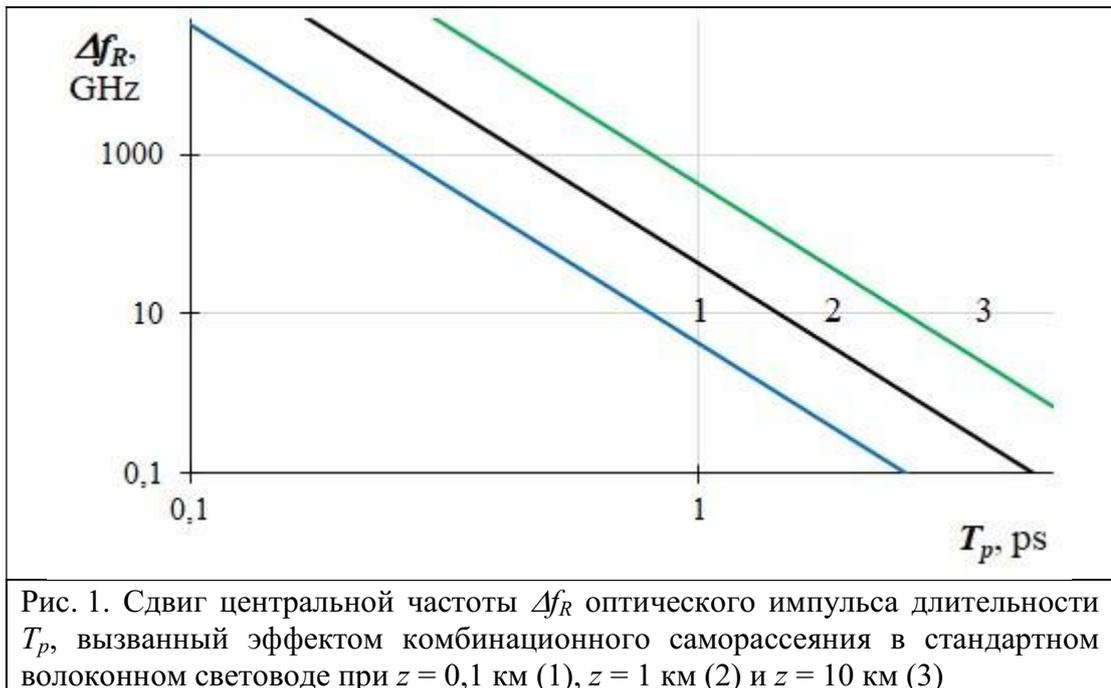
использован для получения источников сверхкоротких импульсов на различных длинах волн. Преимущество этого метода в широте охвата частотного диапазона, в простоте и доступности исполнения. Целью данной работы является анализ возможности получения символьной последовательности сверхкоротких импульсов на различных длинах волн для систем со спектральным уплотнением каналов и численное моделирование в программе Optisystem.

Эффект комбинационного саморассеяния сверхкороткого импульса с физической точки зрения приводит к непрерывному сдвигу вниз несущей частоты импульса, когда спектр импульса становится столь широким, что высокочастотные компоненты импульса могут передавать энергию низкочастотным компонентам того же импульса посредством комбинационного усиления [1–3].

Для оптического солитона $\eta = 1$ сдвиг частоты, вызванный комбинационным саморассеянием, в размерных единицах представляется как [1]:

$$\Delta\omega_R(z) = -\frac{8}{15} \frac{|\beta_2| T_R}{T_0^4} z,$$

где β_2 – дисперсия в волоконном световоде, T_R – параметр, характеризующий эффект комбинационного саморассеяния в волоконном световоде, обычно $T_R = 3$ фс, параметр T_0 связан с длительностью T_p импульса соотношением: $T_p = 1,763 T_0$, z – длина волоконного световода (рис. 1).



Отрицательный знак указывает на то, что несущая частота уменьшается, то есть спектр импульса смещается в сторону больших длин волн («красный» сдвиг). Величина частотного сдвига в предположении отсутствия потерь в волоконном световоде представлена на рис. 1.

При длительности импульсов, близких к 1 пс или менее, спектральная ширина импульса столь велика, что эффект вынужденного комбинационного саморассеяния оказывает значительное влияние на пространственную эволюцию импульсов. Что еще важно, этот процесс продолжается вдоль световода (зависимость от z), то есть частотный сдвиг возрастает с расстоянием.

В реальном световоде на эволюцию импульсов влияют потери в волоконном световоде. Энергия импульса уменьшается, а его длительность увеличивается, так что эффект смещения центральной частоты импульса ослабевает, рис. 2.

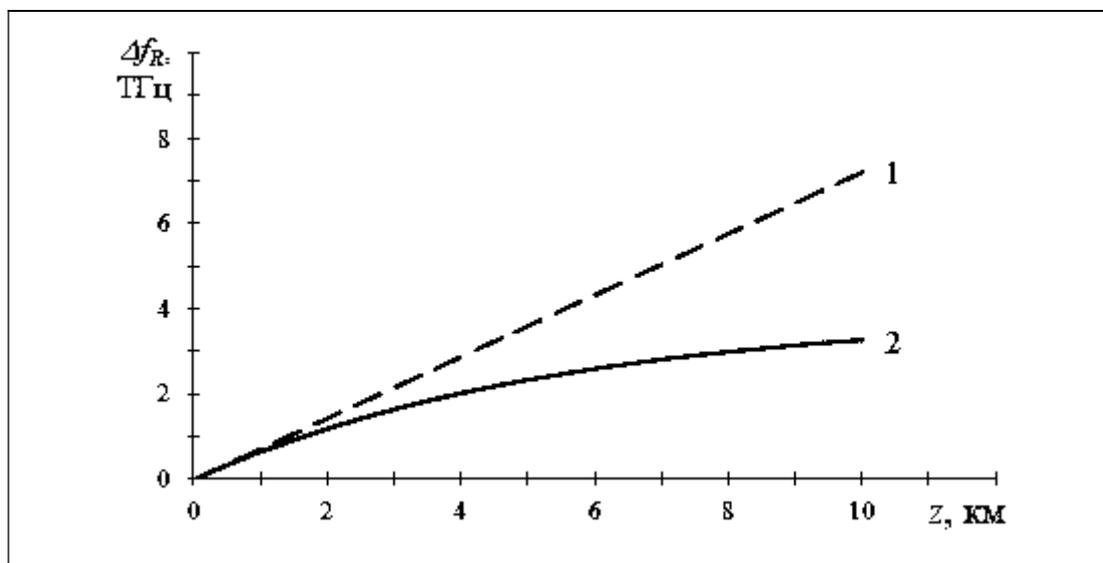


Рис. 2. Зависимость смещения центральной частоты оптического импульса в зависимости от расстояния распространения по волоконному световоду при начальной длительности $T_p = 0,5$ пс: 1 – без учета потерь, 2 – с потерями 0,2 дБ/км, $\beta_2 = 20$ пс²/км

Моделирование проводилось в программе OptiSystem. В качестве источника цифровой последовательности сверхкоротких импульсов предполагался источник, генерирующий импульсы длительности 0,5 пс, следующие со скважностью 5 в стандартном волоконном световоде с дисперсией $\beta_2 = 20$ пс²/км. На рис. 3 показаны спектры на входе и выходе световода длиной 3 км. Видно, что смещение центральной частоты превышает ширину спектра символического импульса. Величина смещения соответствует расчетному значению.

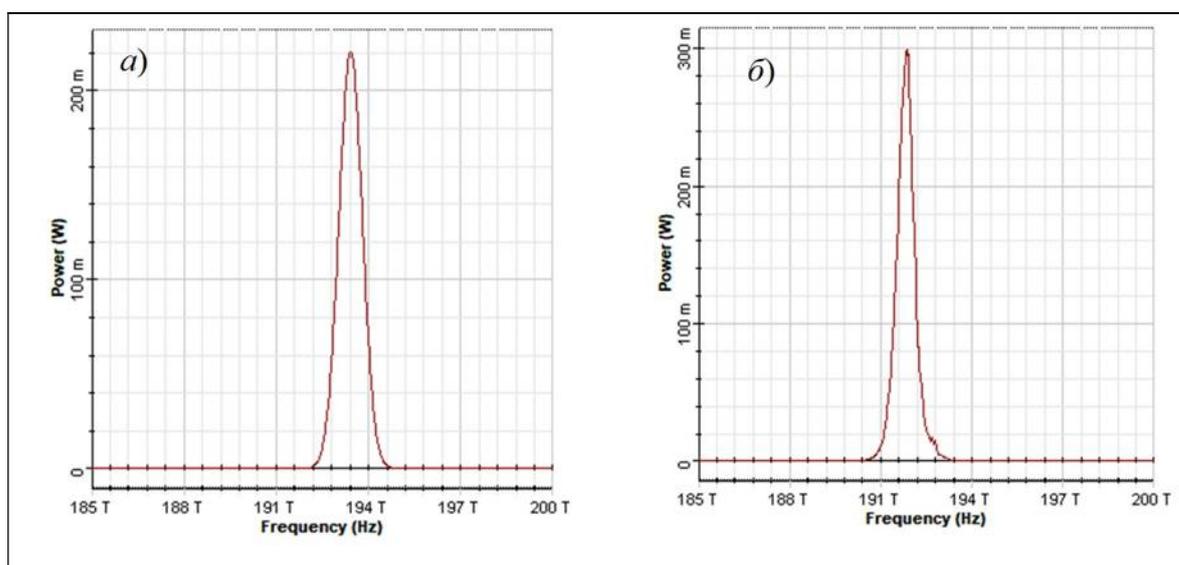


Рис. 3. Спектр символического импульса на входе (а) и на выходе (б) световода

Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Том № 01. № 03 (03)
<https://lasers-measurement-information.ru>

Моделирование в программе OptiSystem подтвердило, что за счет использования нелинейного эффекта комбинационного саморассеяния в волоконном световоде можно получить источники, работающие на различных несущих частотах. Использование эффекта комбинационного саморассеяния позволяет создавать перестраиваемые по частоте (рабочей длине волны) источники сверхкоротких импульсов для высокоскоростных волоконно-оптических сетей со спектральным уплотнением.

Конфликт интересов

Автор статьи заявляет, что у него нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и ему ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Ю. С. Кившарь, Г. П. Агравал. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: Физматлит, 2005. – 648 с.
2. Г. П. Агравал. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. – 323 с.
3. G. Gordon. Theory of the soliton self-frequency shift // Opt. Letters, 1986. V. 11, no. 10, p. 662–664.

Investigation of the features of the formation of a high-speed sequence of optical pulses with a tuning of the carrier frequency for FOCL with wavelength division multiplexing

Andreev D. P.

*195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya street 29,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

The possibility of tuning the carrier frequency of a symbolic sequence of ultrashort optical pulses by using the nonlinear properties of a fiber is analyzed. Numerical modeling of this process was carried out in the OptiSystem program. The possibility of shifting the carrier frequency of optical pulses for use in fiber-optic communication lines with wavelength division multiplexing has been confirmed.

Key words: fiber-optic communication lines, optical fiber, nonlinear effects.

ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2021_1_3_42

УДК 535.8

ГРНТИ 29.31.27

Исследование оптических резонансов, возникающих в рассеянном поле излучения волоконного Yb-лазера в прозрачных диэлектрических средах

Осипов В. В., Тихонов Е. В., Платонов В. В., Лисенков В. В., Кременецкий М. В.

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106,
Институт электрофизики УрО РАН

e-mail: tikhonov@iep.uran.ru

При помощи численного моделирования исследовано рассеяние излучения волоконного лазера в среде из прозрачных диэлектрических частиц. Моделирование проведено для ряда материалов, имеющих разброс показателя преломления в широком диапазоне (MgF_2 , CaF_2 , SiO_2 , BaF_2 , MgAl_2O_4 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , YSZ, TiO_2). Обнаружено, что в пределах ширины спектральной линии излучения $\lambda = (1,07 \pm 0,00325)$ мкм максимальная интенсивность может варьироваться в широком диапазоне значений, что качественно согласуется с большим разбросом экспериментально измеренных времён задержки появления лазерного факела. Показано, что локальный максимум является источником первоначального нагрева материала, что способствует потере последним прозрачности и его дальнейшему объёмному разрушению.

Ключевые слова: лазерная абляция, волоконный иттербиевый лазер, рассеяние Ми, метод конечных элементов, время задержки появления лазерного факела.

Метод лазерной абляции сегодня активно используется для получения нанопорошков, нужных для синтеза оптической керамики и создания ячеек ТОТЭ [1, 2]. При помощи волоконного лазера ($\lambda=1,07$ мкм) нами уже синтезировались порошки типа Y_2O_3 , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , YSZ и др [3–5]. Эти материалы обладают высокой прозрачностью на $\lambda=1,07$ мкм. Было показано, что важную роль при испарении мишени, спрессованной из микронных частиц, играет рассеивание излучения на дефектах кристаллической структуры, зависящее от показателя преломления материала n . Так, CaF_2 и 1% Nd: Y_2O_3 имеют близкие показатели поглощения ($\sim 1 \dots 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$), но разный n (1,43 для CaF_2 и 1,90 для Y_2O_3). При равной мощности излучения волоконного лазера 600 Вт производительность получения нанопорошка 1% Nd: Y_2O_3 была 23 г/час, а мишень из CaF_2 даже не испарялась, что представляет большой научный и прикладной интерес.

В докладе приводятся результаты численного моделирования рассеяния излучения волоконного иттербиевого лазера в мишени из сферических частиц диаметрами 0,4...3 мкм при плотности упаковки $\sim 55\%$ и её нагрева. Модель основана на самосогласованном решении уравнения Гельмгольца и уравнения теплопроводности. Расчёт проводился для материалов с различными n : MgF_2 , CaF_2 , Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , Y_2O_3 , YSZ и TiO_2 . Рассчитанное распределение электромагнитного поля имеет сложную структуру с

локальными максимумами интенсивности, обусловленными интерференцией падающего, отражённого и преломлённого излучения. Интенсивность в них зависит от диаметра частиц D , их показателя преломления n и длины волны излучения λ . Варьирование длины волны в пределах ширины спектральной линии излучения ($1,07 \pm 0,00325$) мкм показало существование разброса значений максимальной интенсивности для всех материалов при постоянной интенсивности падающего излучения $0,46 \text{ МВт/см}^2$. Концентрация излучения в локальном максимуме может облегчить инициирование начального нагрева материала. На примере MgAl_2O_4 показано, что распределение температуры в мишени коррелирует с распределением электромагнитного поля. При этом наибольшие значения температуры реализуются в участках, соответствующих локальным максимумам. Вышенаписанное качественно объясняет разброс времён задержки появления лазерного факела: для каждого участка мишени реализуется случайное соотношение величин D и λ , что приводит к различиям в динамике нагрева материала, и, как результат, к существенному разбросу времён задержки. Кроме того, с ростом показателя преломления величина разброса максимальной интенсивности также возрастает: для CaF_2 диапазон разброса составил $8,44 \dots 11,4 \text{ МВт/см}^2$, а для TiO_2 – уже $6,89 \dots 161,4 \text{ МВт/см}^2$, что согласуется с уменьшением времени задержки при росте n .

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 20-08-00054 А и №20-38-70022.

Список литературы

1. Осипов В. В., Лисенков В. В., Платонов В. В., Тихонов Е. В. Процессы взаимодействия лазерного излучения с пористыми прозрачными материалами при их абляции. Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 3. С. 235–243.
2. Osipov V. V., Solomonov V. I., Platonov V. V., Tikhonov E. V., Medvedev A. I., Podkin A. V. Synthesis of $\text{Fe:MgAl}_2\text{O}_4$ nanopowders into laser plum. International Research Journal. 2018. No. 8(74). P. 32–39.
3. Osipov V. V., Platonov V. V., Lisenkov V. V., Tikhonov E. V., Podkin A. V. Study of nanoparticle production from yttrium oxide by pulse-periodic radiation of ytterbium fibre laser. Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2018. V. 124. No. 1. P. 3.
4. Осипов В. В., Соломонов В. И., Подкин А. В., Шитов В. А., Тихонов Е. В., Корсаков А. С. Синтез и исследование нанопорошков и керамики магний-алюминиевой шпинели, активированной медью. Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 1. С. 157–162.
5. Pirri A., Toci G., Patrizi B., Vannini M., Maksimov R. N., Osipov V. V., Shitov V. A., Tikhonov E. V., Yurovskikh A. S., Vecucci M. $\text{Yb}^{3+}:(\text{Lu}_x\text{Y}_{1-x})_2\text{O}_3$ mixed sesquioxide ceramics for laser applications. Part I: Fabrication, microstructure and spectroscopy. Journal of Alloys and Compounds. 2021. V. 869. P. 159227.

Investigation of optical resonances arising in the scattered radiation field of a Yb fiber laser in transparent dielectric media

V. V. Osipov, E. V. Tikhonov, V. V. Platonov, V. V. Lisenkov, M. V. Kremenetsky

620016, Yekaterinburg, st. Amundsen, 106

Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

The scattering of radiation from a fiber laser in a medium made of transparent dielectric particles is studied using numerical simulation. The simulation was carried out for a number of materials with a wide range of refractive index (MgF_2 , CaF_2 , SiO_2 , BaF_2 , MgAl_2O_4 , Al_2O_3 , Y_2O_3 , YSZ, TiO_2). It is found that within the width of the spectral line of radiation ($\lambda = (1.07 \pm 0.00325) \mu\text{m}$), the maximum intensity can vary in a wide range of values, which is qualitatively consistent with a large spread of experimentally measured delay times for the appearance of a laser flare. It is shown that the local maximum is the source of the initial heating of the material, which contributes to the loss of transparency by the latter and its further volumetric destruction.

Key words: laser ablation, fiber ytterbium laser, Mie scattering, finite element method, delay time of laser flare appearance.