

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 Письменная 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.

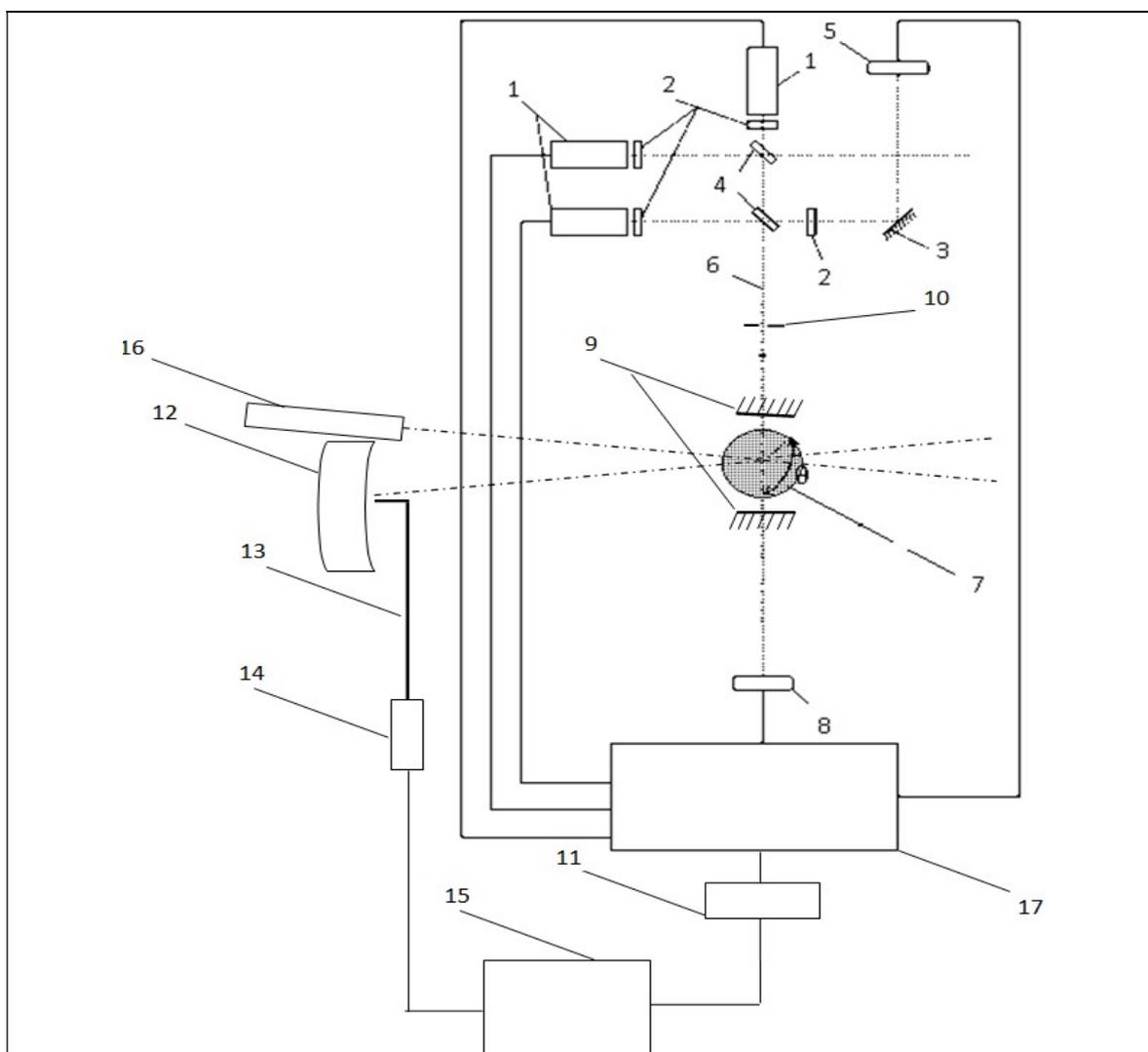


Рис. 1. Оптическая схема лазерной системы: 1 – лазеры на длинах волн 650, 1064, 405 нм; 2 – светофильтры; 3 – зеркало; 4 – светоделительные стекла; 5 – опорный фотоприемник; 6 – лазерный пучок; 7 – аэрозольный поток; 8 – фотоприемник МСП; 9 – система зеркал; 10 – пластинка с отверстием; 11 – АЦП; 12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

Лазерная установка имеет следующее устройство и принцип действия. Источники лазерного излучения *1* модулируют излучение на трёх длинах волн: 405, 1064, 650 нм. На пути прохождения лазерных лучей установлены светофильтры *2*, светоделительные стекла *4*, зеркало *3*, пластинка с отверстием *10*, система зеркал *9*. На противоположной от источников излучения стороне установлен фотоприемник ослабленного излучения *8*. Излучение, не прошедшее через измерительный объем аэрозольного потока *7* посредством светоделительных стекол *4* и зеркала *3* попадает на опорный фотоприемник *5*. Кроме того, установка включает в себя блок формирования, регистрации и обработки сигналов, состоящий из измерительных и опорных синхронных детекторов, усилителя мощности и генератора импульсов [13]. Синхронное детектирование измерительных сигналов предназначено для повышения чувствительности фотоприемного устройства. А лазер *16* генерирует излучение на длине волны 532 нм, падающее в измерительный объем аэрозольного потока *7* под малым углом $\theta \approx 0^\circ$ к оси телескопа *12*, расположенного с лазером *16* по одну сторону от аэрозольного потока. В фокусе телескопа *12* расположен торец световода *13*. Этот световод *13* служит для ввода излучения в спектрометр *14*, который последовательно подключен к ПК *15*.

Структурная схема блока формирования, регистрации и обработки сигнала представлена на рис. 2.

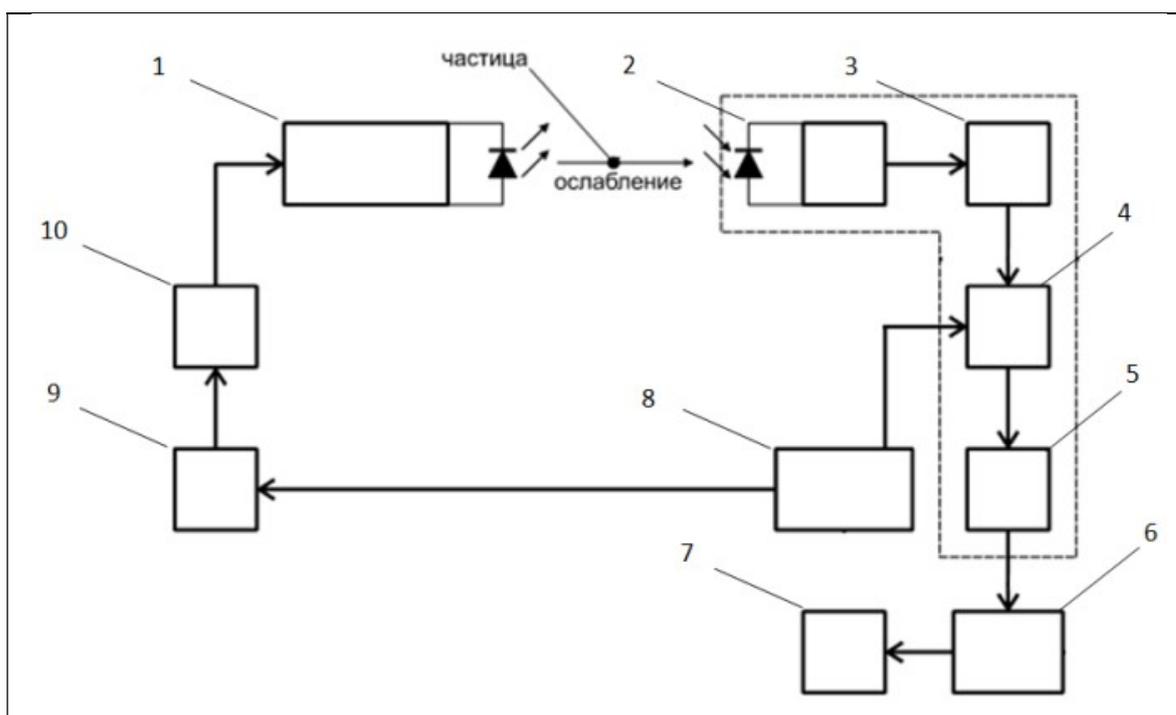


Рис. 2. Структурная схема блока формирования, регистрации и обработки сигнала: *1* – источник лазерного излучения; *2* – фотоприемник; *3*, *5* – дифференциальный усилитель; *4* – синхронный детектор; *6* – аналогово-цифровой преобразователь; *7* – персональный компьютер; *8* – генератор импульсов; *9* – модулятор; *10* – усилитель мощности

Лазерная система работает следующим образом: лазерами *1* генерируется излучение на трёх длинах волн (405 нм, 532 нм, 1064 нм) с частотой $5 \cdot 10^3$ Гц. С целью выделения в модулированном излучении нужных длин волн на пути прохождения лазерных лучей размещены светофильтры *2*.

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, поступающая на систему зеркал 9, проходит сквозь аэрозольный поток 7. Перед системой зеркал 9 установлена диафрагма, предназначенная для отсекаания 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.

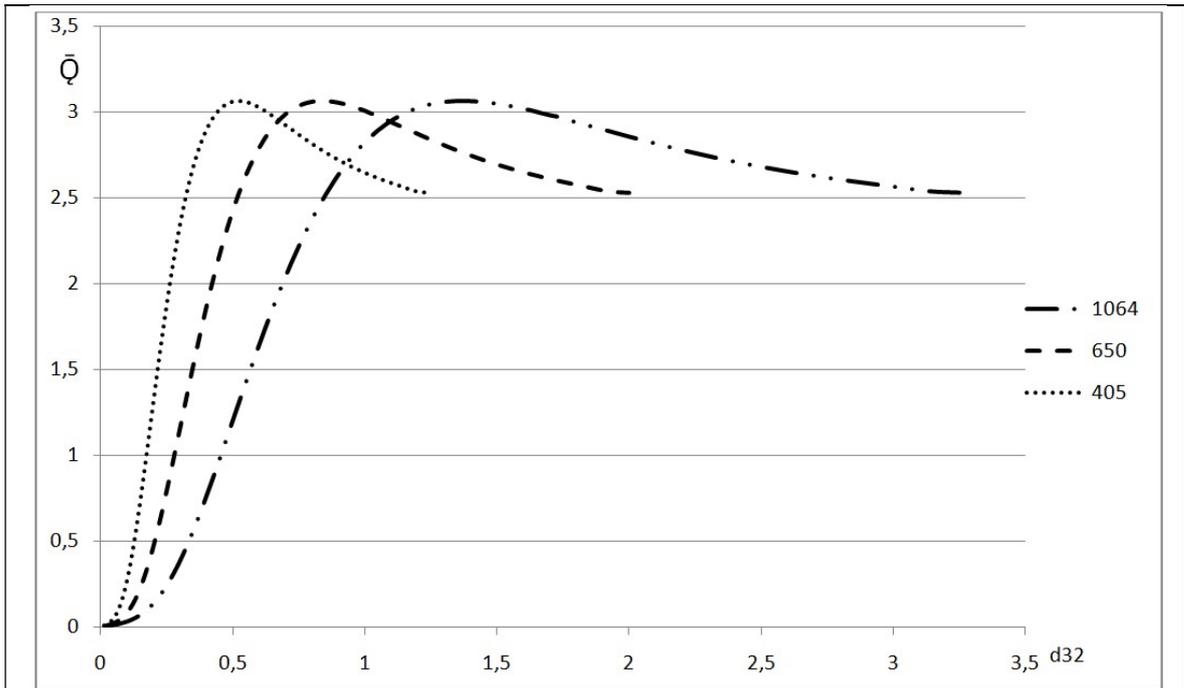


Рис. 3. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от усредненных факторов эффективности

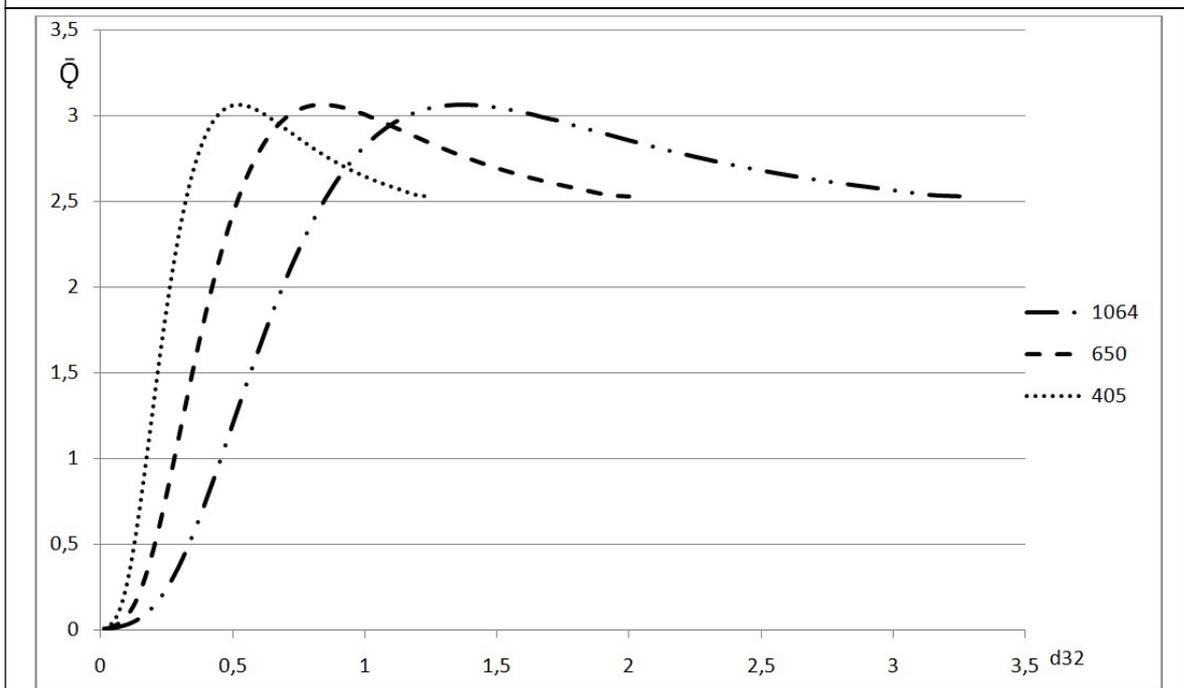


Рис. 4. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн

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.