

# Лазеры. Измерения. Информация

Том 1, № 2 / 2021



Новороссийск  
2021

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

Том 1, № 2 (2)  
Июнь-август 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](mailto:editor-laser@nb-bstu.ru)

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

Опубликовано 17.08.21

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

Содержание:

### **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

*Привалов В. Е., Туркин В. А., Шеманин В. Г.*

О лазерно-информационных технологиях в водородной энергетике ..... стр. 4

*Огнев Б. И., <sup>2</sup> Складчиков С. А., <sup>\*3</sup> Чуляева Е. Г..*

Влияние турбулентности на распространение оптических сигналов с длиной волны 1550 нм ..... стр. 12

*Веденин Е. И., Сарычев И. А., Чартий П. В., Чербачи Ю. В., Шеманин В. Г.*

Лазерная система для исследования аэрозольных потоков методом дифференциального ослабления и рассеяния лазерного излучения в видимой и ближней ИК области ..... стр. 17

### **КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

*Чунгурова Т. Л., Мкртычев О. В.*

Метод определения динамики оптической прочности материалов ..... стр. 26

*Чербачи Ю. В., Мкртычев О. В.*

Сравнение значений пробойной энергии при различных длительностях лазерного импульса ..... стр. 30

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

doi: 10.51639/2713-0568\_2021\_1\_2\_4

УДК 535.621(075.8)

ГРНТИ 44.01.90, 44.31.38, 29.31.27

### О лазерно-информационных технологиях в водородной энергетике

\*<sup>1</sup> Привалов В. Е., <sup>2</sup> Туркин В. А., <sup>3</sup> Шеманин В. Г.

<sup>1</sup> 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> 353918, Россия, г. Новороссийск, пр. Ленина 39, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова

<sup>2</sup> 353919, Россия, г. Новороссийск, Мысхакское шоссе 75, Новороссийский филиал БГТУ им. В. Г. Шухова

email: \* [vaevpriv@yandex.ru](mailto:vaevpriv@yandex.ru), [shemanin-v-g@nb-bstu.ru](mailto:shemanin-v-g@nb-bstu.ru)

Рассмотрены азы водородной энергетике и, в частности, возможности использование достижений лазерно-информационной технологий. Для обеспечения безопасности и диагностики утечек водорода выполнена оценка возможности измерения концентрации молекул водорода в диапазоне концентраций  $10^{13} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в атмосфере на расстояниях зондирования до 100 м и найдено, что времени измерения от 400 нс до 26,5 мин достаточно и это можно реализовать в одном лидаре комбинационного рассеяния света.

*Ключевые слова:* лазерно-информационные технологии (ЛИТ), молекула водорода, топливный элемент, лидар комбинационного рассеяния света (КРС), атмосфера, концентрация, время измерения.

## 1. Введение

Топливом в традиционной энергетике много веков служили и служат дрова, уголь, торф, нефтепродукты, включая природный газ. Последний, как известно, состоит, в основном, из пропана  $\text{C}_3\text{H}_8$  и бутана  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ . Эти виды топлива, по крайней мере, ещё десятилетия, будут служить основой энергетике. К такой энергетике есть претензии. Теплотехника и механика характеризуются, как правило, низким коэффициентом полезного действия (КПД). Сжигание указанных видов топлива характеризуется выбросами окислов углерода, азота (и не только), что резко ухудшает экологическую обстановку. Поэтому взгляды энергетиков сосредоточены на других энергоносителях и другом энергообмене (например, превращении химической энергии прямо в электрическую). Появляются международные проекты, предполагающие к 2050 году исключить ископаемые энергоносители из энергетике [1]. Разумеется, к реальным физическим причинам примешиваются интересы конкретных стран, плохая обеспеченность энергоресурсами и, наконец, чисто политические мотивы.

## 2. Водород

Водород, по-видимому, наиболее распространенный в природе элемент таблицы Менделеева [2, 3]. Водородом в газовой фазе заполнен космос. В виде плазмы он составляет значительную массу звезд, включая Солнце. Космические лучи, в том числе, корпускулярное излучение Солнца, в большой мере состоит из ядер водорода (протонов). Водород составляет примерно 1 % массы

земной коры. В составе самого распространенного на Земле вещества – воды масса водорода составляет более 11 %.

Водород самое легкое и энергоемкое топливо. Поэтому его предполагают использовать в качестве одного из основных теплоносителей энергетики будущего. Не следует думать, что это явилось единственной причиной интереса к водороду. Известно, что производством водорода интересовались в Англии еще в XIX веке [4]. Водород используют для повышения качества бензина, производства удобрений (в первую очередь, азотных), улучшения качества стали, для гидроочистки, регенерации катализаторов, в пищевой промышленности и др.

По-видимому, наиболее эффективным топливом водород является при термоядерной реакции [5]. При этом наблюдается самый большой выход энергии на единицу массы используемого топлива и самая экономичная реакция, учитывая количество водорода в природе, и самая экологически чистая. Более чем за полвека, человек пока не достиг осуществления управляемого термоядерного синтеза. Не решена ещё и проблема получения энергии с помощью «микровзрывов». Поэтому встает вопрос о других способах сжигания водорода. Результаты сжигания зависят ещё и от степени чистоты водорода, а она зависит от способа производства.

### 3. Производство водорода

Весьма чистый водород получается при электролизе воды, который обычно осуществляется на постоянном токе. Однако при этом способе электролиза затраты электрической энергии на производство водорода превосходят энергию от его сжигания. Полученный электролизом водород называют «зеленым». Другой чистый водород получают электролизом от ядерной энергетики. Его называют «желтым» или «оранжевым».

Промышленное производство водорода сегодня обычно ведут конверсией природного газа или метана («серый» водород): водяной пар ( $700...1000^{\circ}\text{C}$ ) смешивается с природным газом или метаном под давлением в присутствии катализатора. Пропуская струю воды через нагретый уголь, получают «бурый» водород. Это наиболее грязные виды водорода. Если «серый» водород очистить от образовавшегося углекислого газа, который преобразуют в твердый углерод, то получают «голубой» водород, который чище «серого», но уступает «зеленому».

При электролизе воды в кислой среде выделяется водород, в щелочной – кислород. Эффективность выделения определяется катализаторами. Например, для выделения кислорода, используют гексаферриты с никелем или титаном [6].

Серьезным шагом вперед в производстве водорода стал топливный элемент (водородная ячейка) Стэнли Мейера [7, 8]. Ячейка работает на воде, катализатором служит сода. Водород и кислород высвобождаются из воды, которая является диэлектрической средой в электрическом резонансном контуре. Рис. 1 и 2 помогают понять принцип действия. На рис. 1 представлены силы, действующие в молекуле воды. Внешнее электрическое поле ослабляет силы взаимодействия атомов водорода и кислорода и разрывает молекулу воды.

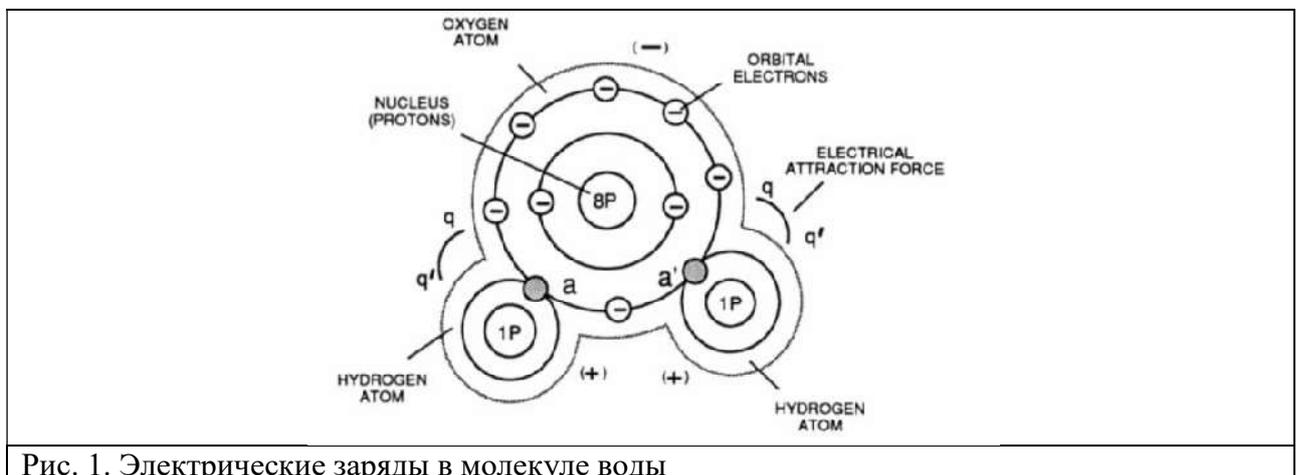


Рис. 1. Электрические заряды в молекуле воды

А на рис. 2 приведена электрическая схема элемента Мейера. Он представляет собой резонансный зарядный дроссель 4 соединенный последовательно с ячейкой возбуждения 5.

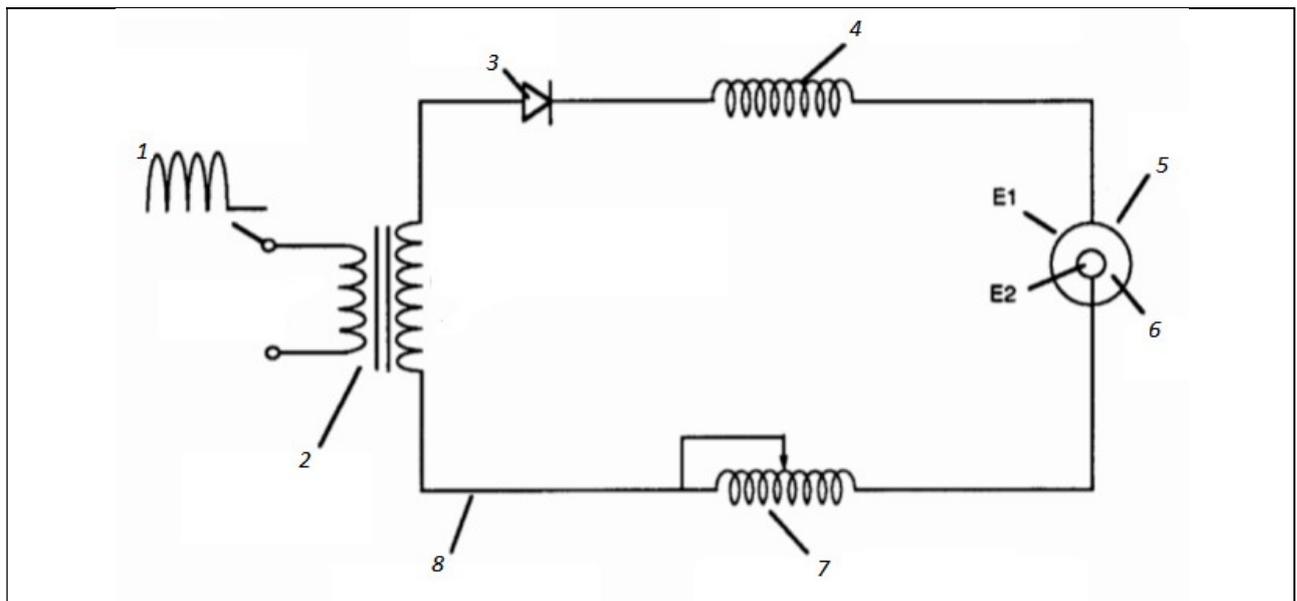


Рис. 2. Принципиальная схема установки из [8]: 1 – переменное импульсное напряжение, 2 – изолированный импульсный трансформатор, 3 – блокирующий диод, 4 – резонансный зарядный дроссель, 5 – ячейка возбуждения (конденсатор), 6 – натуральная вода, 7 – подстраиваемый резонансный зарядный дроссель, 8 – изолированная электрическая земля

В работах [9–13] описаны усовершенствованные топливные ячейки Мейера. Обзор более поздних вариантов, включая лазерные, авторов настоящей статьи приведен в работе [14]. Достоинством всех перечисленных работ является то, что предлагаемое оборудование работает при напряжении 1–2 кВ и токах – несколько мА. Ячейки остаются холодными.

Может сложиться впечатление, что все это пока лабораторные образцы, которые не могут обеспечить большой выход водорода и годятся только для передвижения мелких объектов. Это не так. Мейер демонстрировал фильм, в котором двигалась моторная лодка с водородным двигателем. В Санкт-Петербурге создан и эксплуатируется опытный образец трамвая с водородным двигателем. Японские и немецкие фирмы сообщают об экспериментальных моделях автомобилей с водородным двигателем.

В некоторых двигателях водород не сжигается, а используется прямое превращение химической энергии в электрическую. Применение водородного двигателя особенно перспективно на водном транспорте: не надо возить на борту топливо, не возникает экологических проблем. Естественно, следует выработать требования к очистке воды и разработать или найти подходящее оборудование из уже имеющегося.

#### 4. Диагностика утечек водорода

Для успешной работы водородных двигателей и соответствующих транспортных систем необходимо обеспечить технику безопасности. В первую очередь, диагностику утечек водорода. Лучшее средство для этого – лидары. Авторы настоящей работы давно занимаются этим (см., например, [15]) и рассчитывают на успех.

Ранее, в [2] было показано, лидар комбинационного рассеяния света может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул водорода на уровне концентраций порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  и выше в атмосфере на расстояниях до сотен метров в режиме синхронного счета фотонов и можно сделать выбор оптимальных параметров такого лидара. Однако для измерения концентрации исследуемых молекул надо знать дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света ( $d\sigma/d\Omega$ ) для исследуемой молекулой  $\text{H}_2$  на длине волны лазерного излучения 532 нм.

В спектре комбинационного рассеяния света молекулой  $H_2$  наблюдается мощная полоса собственных колебаний с волновым числом  $\nu_0 = 4161 \text{ см}^{-1}$  [2]. Длина волны полосы комбинационного рассеяния исследуемой молекулы водорода при зондировании на длине волны излучения второй гармоники YAG–Nd лазера с длиной волны 532 нм с таким волновым числом равна 683,2 нм. Это было учтено в экспериментальном лидаре комбинационного рассеяния света, оптическая схема которого приведена на рис. 3.

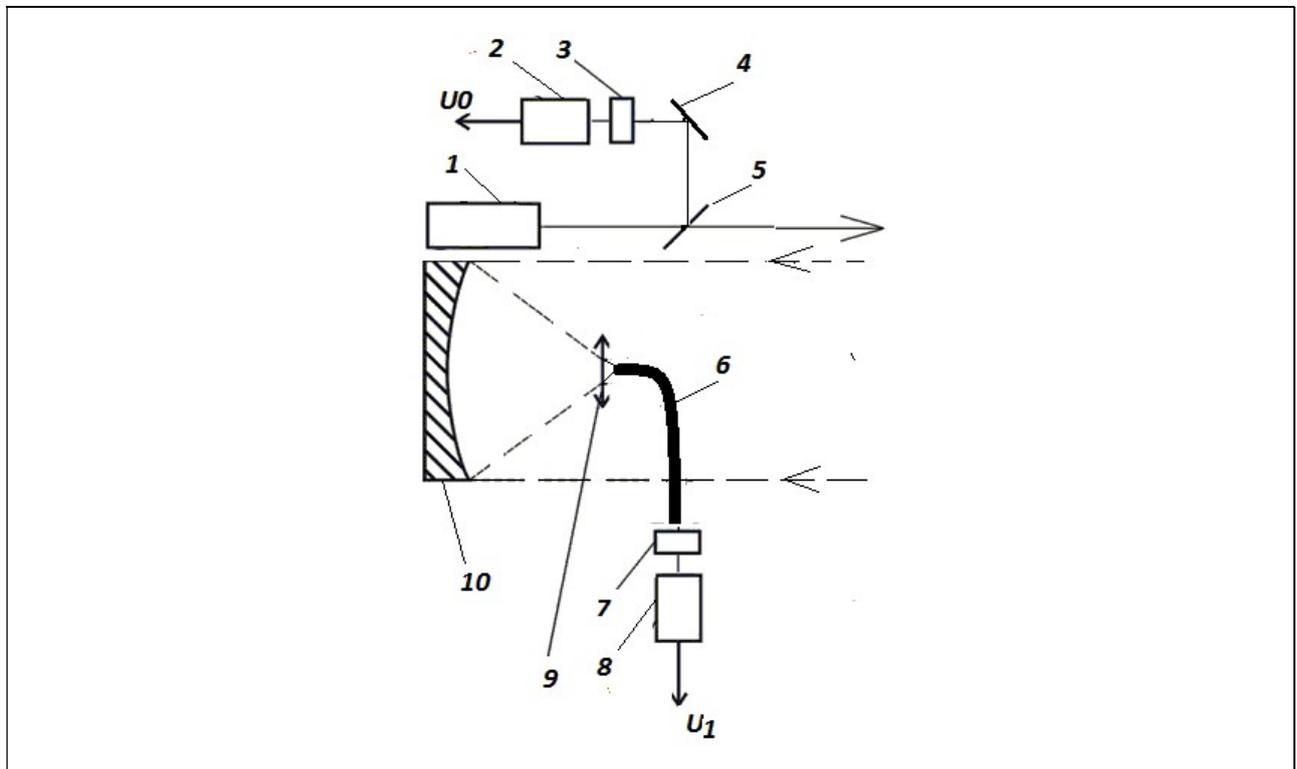


Рис. 3. Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света: 1 – лазер, 2, 8 – фотоприемник, 3, 7 – интерференционный светофильтр, 4 – глухое зеркало, 5 – стеклянная пластина, 6 – волоконный ввод, 9 – линзовый объектив, 10 – сферическое зеркало приемного телескопа

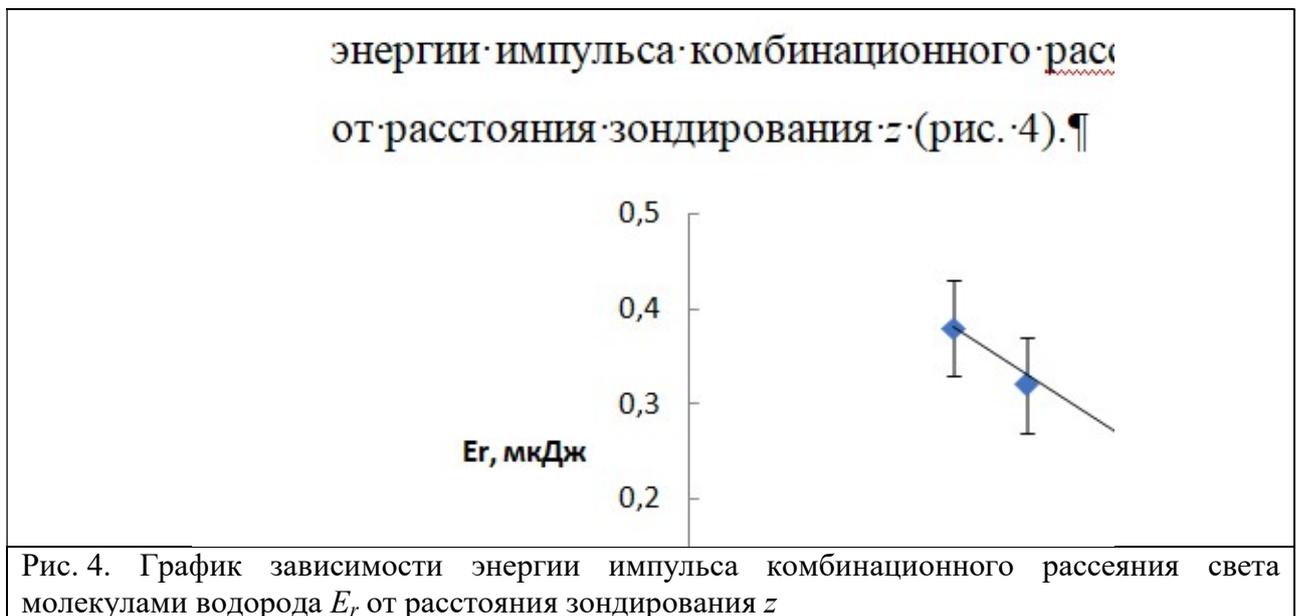
Как уже отмечалось выше, импульс YAG–Nd-лазера 1 длительностью 10 нс и энергией 10 мДж на длине волны 532 нм направлялся в специальную кювету с окнами под углом Брюстера, заполненную чистым водородом, концентрация которого была  $2,7 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Часть лазерного излучения стеклянной пластиной 5 и зеркалом 4 через интерференционный светофильтр 3 направлялось на фотодиод 2 для контроля энергии лазерного импульса и синхронизации работы всего лидара (сигнал  $U_0$  — опорный сигнал, который задает начало отсчета времени, а его амплитуда — энергию лазерного импульса). Рассеянное назад излучение комбинационного рассеяния света молекулами  $H_2$  собиралось с расстояния до 2 м телескопом типа Ньютона с сферическим зеркалом 10 и линзой 9 в волоконный световод 6 и через интерференционный светофильтр 7 с максимумом пропускания на длине волны комбинационного рассеяния полушириной 2 нм направлялось на фото приемник 8, сигнал  $U_R$  с которого записывался специальной микропроцессорной измерительной системой [15], работающей на линии с ПК, и был пропорционален энергии комбинационного рассеяния света молекулами водорода. Средние значения  $U_R$  с погрешностями для многократных измерений на каждом расстоянии зондирования  $z$  приведены в таблице 1. Для пересчета амплитуды сигнала лидара комбинационного рассеяния в энергию импульса комбинационного рассеяния были проведены калибровочные эксперименты по измерению коэффициента передачи фотоприемного модуля [2]. Обработка результатов этих экспериментов позволила получить коэффициент передачи оптоэлектронного тракта  $K_\phi = 0,4 \pm 0,1 \text{ мкДж/В}$ .

Таблица 1

Измеренные значения сигнала и импульсные значения энергии комбинационного рассеяния света молекулами водорода для различных расстояний зондирования

$z$ , м	$U_R$ , В	$\Delta U_R$ , В	$E(z)$ , мкДж
0,97	0,95	0,12	0,36
1,1	0,80	0,14	0,31
1,3	0,68	0,15	0,23
1,6	0,35	0,16	0,13
1,75	0,19	0,17	0,09

По данным значениям энергии комбинационного рассеяния света, приведенным в четвертом столбце таблицы 1, построена зависимость энергии импульса комбинационного рассеяния света молекулами водорода  $E_r$  от расстояния зондирования  $z$  (рис. 4).



## 5. Дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света молекулами $H_2$

Мощность регистрируемого сигнала комбинационного рассеяния в общем случае связана с измеряемой энергией на длине волны  $\lambda$ , принимаемой фотоприемником за время измерения  $\tau_1 = 50$  нс, следующей зависимостью

$$P(\lambda, z) = \frac{E(\lambda, z)}{\tau_1},$$

где  $P(\lambda, z)$  — мощность сигнала комбинационного рассеяния света на фотоприемнике на длине волны  $\lambda$ , приходящего с расстояния  $z$ ;  $E(\lambda, z)$  — энергия импульсного сигнала комбинационного рассеяния на фотоприемнике на той же длине волны;  $\tau_1$  — длительность лазерного импульса.

В нашей экспериментальной ситуации мощность регистрируемого излучения комбинационного рассеяния в предположении однократного рассеяния в направлении назад и отсутствии ослабления излучения на воздушной трассе длиной до 2 м можно описать лидарным уравнением для комбинационного рассеяния света типа [2, 15]:

$$P(\lambda, z) = P_L K_1 \Delta z A_0 \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \frac{N_a}{z^2}. \quad (1)$$

где  $P_L$  — мощность лазера;  $\lambda_L$  — длина волны лазера;  $K_1$  — постоянная лидара;  $\Delta z$  — шаг по расстоянию,  $\Delta z = \frac{c\tau_L}{2}$ ;  $A_0$  — площадь приемного телескопа;  $(d\sigma/d\Omega)$  — дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света исследуемой молекулой на длине волны лазера и  $N_a$  — концентрация молекул.

Далее, для нашего случая лидара комбинационного рассеяния света в постоянной лидара  $K_1$  можно выделить множитель  $\xi_p(\lambda)$ , зависящий от спектральной чувствительности фотокатода

фотоприемника в виде выражения  $K_1 = K_2 \cdot \xi_p(\lambda)$ , где  $K_2$  — новая постоянная лидача, равная 0,495 на длине волны 532 нм (по данным наших измерений [15]). Относительная спектральная чувствительность фотокатода ФЭУ на длине волны 683,2 нм  $\xi(\lambda) = 0,25$  по данным [16].

Решение лидарного уравнения (1) для комбинационного рассеяния с такими параметрами позволило найти дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света молекулами  $H_2$  ( $d\sigma/d\Omega$ ) при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 532 нм. Оно получилось равным  $(4,3 \pm 0,9) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2/\text{ср}$ , что хорошо согласуется с данными других авторов [2].

Используя это значение, выполним численное решение лидарного уравнения (1), переписав его для чисел фотонов [2, 17], для длин волн лазерного излучения 405, 532 и 650 нм с частотой следования лазерных импульсов 100 кГц, энергии в импульсе 1 мДж и диапазона расстояния зондирования 5...100 м и получим зависимости времени измерения  $t$  от расстояния зондирования  $z$  для концентрации водорода  $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и выбранных длин волн лазерного излучения при зондировании в атмосфере таким лидаром, как на рис. 3. Поэтому для зондирования молекул водорода достаточно времени измерения от 400 мс до 2,65 мин, что возможно реализовать в одном лидаре комбинационного рассеяния света в конкретных экспериментальных условиях [15, 18].

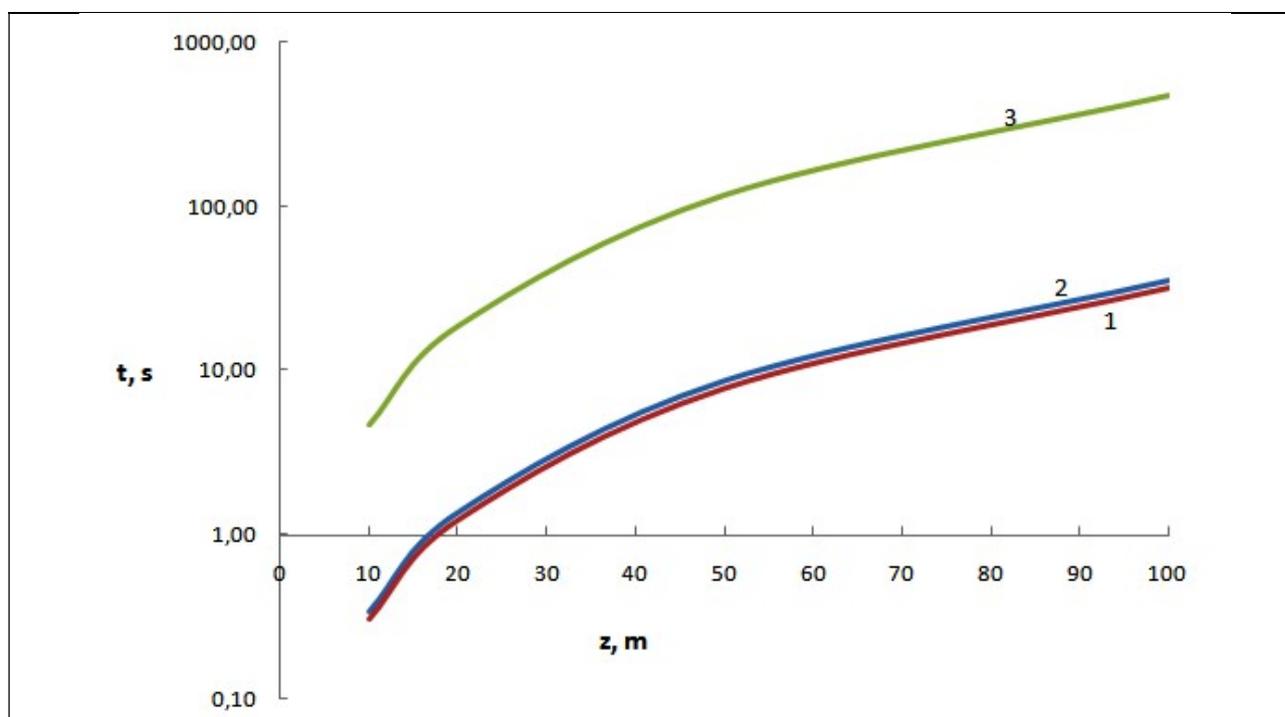


Рис. 5. График зависимости времени измерения  $t$  (в логарифмическом масштабе, в с) от расстояния зондирования  $z$  из [2] для концентрации водорода  $N(z) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и длин волн лазерного излучения 405(1), 532(2) и 650(3) нм при зондировании в атмосфере таким лидаром

## 6. Заключение

Таким образом, найдено дифференциальное сечение ( $d\sigma/d\Omega$ ) комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами  $H_2$  на длине волны лазерного излучения 532 нм, используя которое можно измерять концентрацию молекулярного водорода  $N(z)$  в газовых потоках и чистой атмосфере на заданных расстояниях от излучателя с высокой точностью и пространственным разрешением 7,5 м. Для зондирования молекул водорода получен диапазон времени измерения от 400 мс до 2,65 мин, что позволяет использовать лидар комбинационного рассеяния света в конкретных экспериментальных условиях.

## 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. П Щукин. В России нашли альтернативу газу и углю. [Электронный ресурс] URL: [https://lenta.ru/news/2021/04/15/vodor/?utm\\_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm\\_campaign=dbr](https://lenta.ru/news/2021/04/15/vodor/?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com&utm_campaign=dbr) (02.05.2021).
2. В. Е. Привалов, А. Э. Фотиади, В. Г. Шеманин. Лидары. С-Пб.: Изд. Политех. 2017. 128 с.
3. М. Роговая. Водород: перспективы энергетического перехода. Журнал "Коммерсантъ Наука" №23. [Электронный ресурс] URL: <https://zen.yandex.ru/media/kommersant/vodorod-perspektivy-energeticheskogo-perehoda-60d49ea701c59234cb830a0b> (02.05.2021).
4. Россия меняет курс с углеводородной на водородную энергетику, но почему и кто это придумал? [Электронный ресурс] URL: [https://zen.yandex.ru/media/scikit/rossiia-meniayet-kurs-s-uglevodorodnoi-na-vodorodnuu-energetiku-no-pochemu-i-kto-eto-pridumal-60c1a45c2d0f390304f491a9?&utm\\_campaign=dbr](https://zen.yandex.ru/media/scikit/rossiia-meniayet-kurs-s-uglevodorodnoi-na-vodorodnuu-energetiku-no-pochemu-i-kto-eto-pridumal-60c1a45c2d0f390304f491a9?&utm_campaign=dbr) (02.05.2021).
5. И. Край. Термоядерный синтез: энергия будущего? [Электронный ресурс] URL: <https://www.mirf.ru/science/termoyadernyj-sintez-energiya-buduschego/> (02.05.2021).
6. Российские ученые открыли катализатор для получения топлива из воды. [Электронный ресурс] URL: <https://tvzvezda.ru/news/20216291131-9RA76.html> (02.05.2021).
7. Stanley A. Meyer. US Patent № 4826581.
8. Stanley A. Meyer. The Birthday of new technology, Water fuel cell, Technical brief, Hydrogen fracturing process, Crove City, Ohio. 1995. [Электронный ресурс] URL: [https://vk.com/doc72110428\\_365553645?hash=cf3a3a09bfb78824b9&dl=23e8b23c85441b4472](https://vk.com/doc72110428_365553645?hash=cf3a3a09bfb78824b9&dl=23e8b23c85441b4472) (13.11.2018).
9. Martins Vanags, Janis Kleperis, Gunars Bajars. Water electrolysis with inductive voltage pulses, INTECH. 2012.
10. George W. Crabtree, Mildred S. Dresselhaus, Michelle V. Buchanan. The Hydrogen Economy. 2004.
11. Naohiro Shimizu, Souzaburo Hotta, Takayuki Sekiya, Osamu Oda. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply. 2005. Springer Link.
12. Nigel Monk, Simon Watson. Review of pulsed power for efficient hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 2016. (13.11.2018).
13. Ф. М. Канарев, В. В. Подобедов, А. И Тлишев. Электролитическая ячейка низкоамперного электролизера для получения водорода из воды. Патент России № 2227817 от 27.04.2004
14. В. Е. Привалов. Устройство для разложения воды. Труды 26 международной научной конференции «Лазерно-информационные технологии». Новороссийск 2018, с. 40–41
15. Э. И. Воронина, В. Е. Привалов, В. Г. Шеманин. Зондирование молекул водорода на лабораторном лидаре КР. Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. № 5. С. 14–17.
16. Справочник по лазерам. Под ред. А. М. Прохорова Т. I. М.: Советское Радио. 1978. 591 с.
17. V. E. Privalov, V. G. Shemanin. Accuracy of lidar measurements of the concentration of hydrofluoride molecules in the atmospheric boundary layer. Measurement Techniques. 2020. V. 63. No. 7. P. 543–548. URL: <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01821-0>

## On laser information technologies in hydrogen energy

\*<sup>1</sup> Privalov V. E., <sup>2</sup> Turkin V. A., <sup>3</sup> Shemanin V. G.

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, St. Petersburg, st. Polytechnicheskaya 29,

<sup>2</sup> *State Maritime University named after Admiral F. F. Ushakov, 353918, Russia, Novorossiysk, Lenin Ave. 39,*

<sup>3</sup> *Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia, Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

The basics of hydrogen energy and, in particular, the possibilities of using the achievements of laser information technologies are considered. To ensure safety and diagnose hydrogen leaks, an assessment was made of the possibility of measuring the concentration of hydrogen molecules in the concentration range of  $10^{13} \dots 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  in the atmosphere at sensing distances up to 100 m and it was found that the measurement time from 400 ns to 26.5 min is sufficient and this can be implemented in one cattle lidar.

*Keywords:* laser information technologies (LIT), hydrogen molecule, fuel cell, Raman scattering (RS) lidar, atmosphere, concentration, measurement time.

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

doi: 10.51639/2713-0568\_2021\_1\_2\_12

УДК 621.373.826

ГРНТИ 29.03.45, 29.03.77, 29.31.27, 29.33.47

**Влияние турбулентности на распространение оптических сигналов с длиной волны 1550 нм**<sup>1</sup> Огнев Б. И., <sup>2</sup> Складчиков С. А., <sup>3</sup> Чуляева Е. Г.<sup>1</sup> Россия, г. Рязань, АО «МОСТКОМ», [www.orcid.org/0000-0003-3088-2318](http://www.orcid.org/0000-0003-3088-2318)<sup>2</sup> Россия, г. Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова, [www.orcid.org/0000-0002-7234-5644](http://www.orcid.org/0000-0002-7234-5644)<sup>3</sup> Россия, г. Рязань, РГРТУ им. В. Ф. Уткина, <https://orcid.org/0000-0002-4459-5857>email: [b\\_ognev@mail.ru](mailto:b_ognev@mail.ru), [skladtchikov@mail.ru](mailto:skladtchikov@mail.ru), [elenachuljaeva@yandex.ru](mailto:elenachuljaeva@yandex.ru)

Целью настоящей работы явилось исследование процесса турбулентности вблизи приемной линзы приемо-передающего лазерного модуля (ППМ), входящего в систему атмосферной линии связи, и выявление изменения коэффициента преломления вблизи приемной площадки. Для этого в настоящей работе проведено в программе АНСИС компьютерное моделирование прохождения оптических сигналов вблизи приемных площадок. Показано, что лазерный луч из-за явления турбулентности расщепляется на несколько нитей. Ввиду того, что вблизи приемных площадок устройств приема оптических сигналов в атмосфере, происходит неравномерное распределение коэффициентов преломления воздуха, лазерные пучки вблизи приемных площадок расщепляются. Это повышает требования к приемным площадкам оптических сигналов. В целях борьбы с явлением турбулентности в установках распространения лазерного луча устанавливают несколько лазерных передатчиков и приемников на разных длинах волн. Это повышает скорость передачи информации и повышает надежность работы устройств.

*Ключевые слова:* турбулентность, оптические сигналы, лазерное излучение, траектория луча, расщепление оптического пучка.

**Введение**

Вопросам распространения оптического излучения в среде уделяется большое внимание. Влияние атмосферы рассматривается в связи с появлением турбулентности вблизи стенок, либо приемных площадок, например, в работах [1–3]. Турбулентное перемешивание приводит к флуктуациям коэффициента преломления. Это в свою очередь приводит к изменениям направления распространения луча и смещению геометрического центра относительно центра наблюдения. Кроме того, происходит расщепление оптического пучка на отдельные «нити». Происходит перераспределение оптической мощности в сечении, при этом общая мощность остается неизменной.

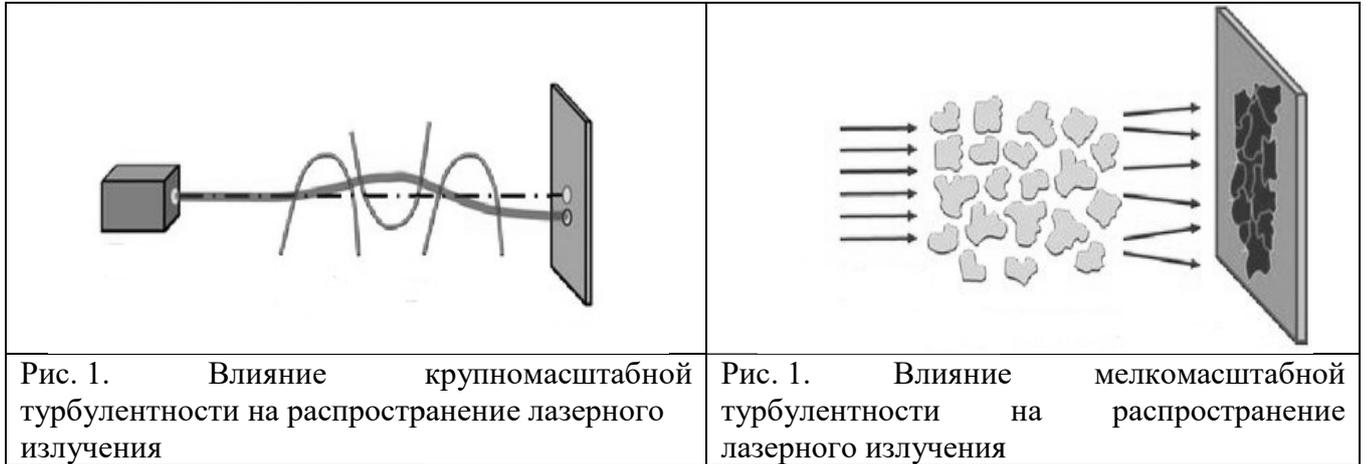
**Экспериментальные исследования**

Как показано в работе [1] потери на рассеяние в атмосфере из-за турбулентности незначительны, однако траектория луча претерпевает изменения, при этом повышается расходимость пучка и возникает неоднородность по сечению (рисунк1).

Приемо-передающий лазерный модуль (ППМ) имеет приемо-передающую оптическую систему, встроенную систему автоматической корректировки оси диаграммы направленности (ОДН), оптический усилитель (ОУ). Характеристики ППМ:

-расходимость передатчика информационного канала – 0,15 мрад;

- моноапертурная оптическая система;
- оптическая система фокусирующего типа;
- базовая длина волны информационного канала – 1550 нм;
- длина волны служебного канала – 785 нм;
- числовая апертура объектива – 0,22;
- угол зрения приемника информационного канала – 0,3 мрад;
- диаметр приемопередающей апертуры – 90 мм;
- качество объектива близко к дифракционному.



Для работы приемо-передающего лазерного модуля используется две длины волны и соответственно реализовано деление на служебный канал (СлК), который выступает в качестве сервисного и отвечает за точное наведение и передачу служебных данных о состоянии удалённого терминала и измерительный информационный канал (ИзК), который используется для прохождения высокочастотных сигналов.

Служебный канал (СлК) работает на длине волны 785 нм. Предназначен для организации работы системы автоматической подстройки осей диаграмм направленности и точного позиционирования терминалов установки друг относительно друга на различных дистанциях. Низкоскоростной канал используется для передачи только служебной информации, которая необходима для работы алгоритмов автоматической подстройки мощности передатчиков на удаленном терминале.

В зависимости от дистанции на которой используется установка, алгоритмы обеспечивают управление сигналом от удаленного маяка, для подстройки ОДН и пространственного совмещения оптических осей СлК и ИзК, передачи информации о состоянии работы ключевых функциональных элементов терминала, параметров, мощности на приёме/передаче, положение штоков приводов системы автоматической настройки ОДН и т. д.

Служебный канал (СлК) имеет более широкие диаграммы направленности для того чтобы упростить процесс наведения. Актуальность использования для служебного канала длины волны 785 нм обусловлено наличием доступных и относительно не дорогих ключевых компонентов: приёмников, передатчиков, высокоскоростных матриц.

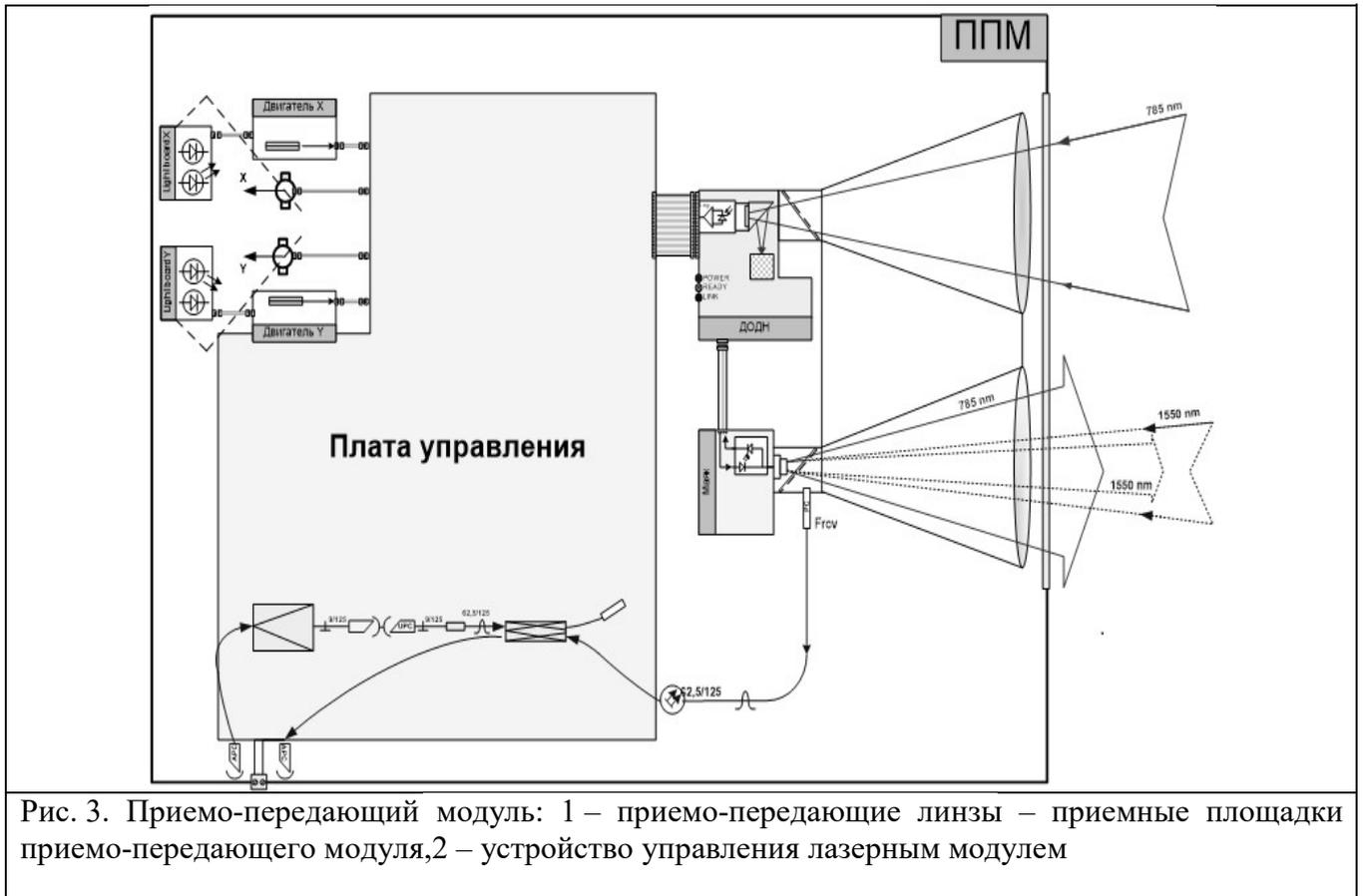
Измерительный (информационный) канал (ИзК) работает на длине волны 1550 нм.

Как видно из рис. 2, основное влияние турбулентность атмосферы будет оказывать вблизи входной –выходной линзы.

Как известно, турбулентность потока газа или жидкости описывается уравнениями Навье–Стокса. Численные решения уравнений Навье–Стокса приводят к нахождению профиля скорости течения газового потока:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \\ \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu}{l} \frac{\partial u}{\partial x} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mu$  – вязкость,  $\rho$  – плотность газа,  $u$  – скорость потока,  $l$  – длина пластины.



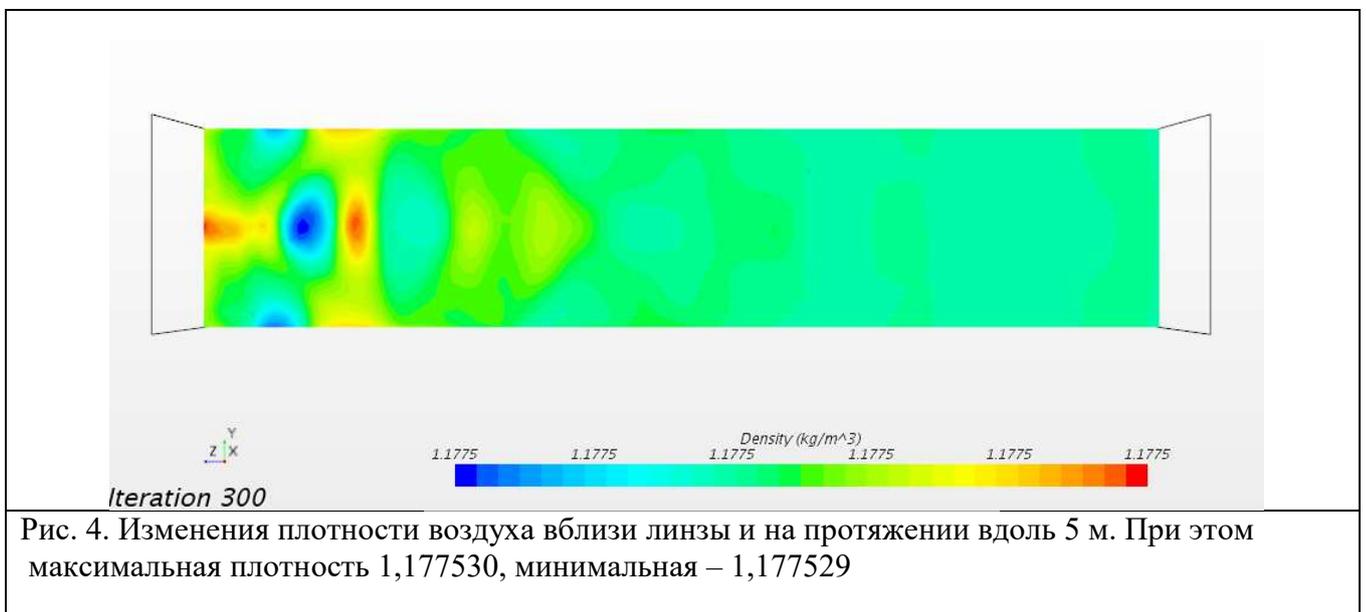
Поскольку мы рассматриваем стационарный процесс в двух координатах  $x$  и  $y$  и учитывая, что  $\rho \frac{\partial u}{\partial t} = 0$ , получим уравнения Стокса в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{dp}{\mu dx}. \quad (2)$$

Учитывая влияние взаимодействия молекулами газа между собой, приведем уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT. \quad (3)$$

Здесь  $p$  – давление газа,  $a$  – постоянная Ван-дер-Ваальса,  $V_m$  – объем газа,  $b, a$  – постоянные для каждого газа величины, определяемые опытным путем.



Таким образом, изменение плотности по координатам  $x$  и  $y$  будет соответствовать изменению скорости воздушного потока. Решается задача о протекании воздушного потока вдоль пластины прямоугольного сечения. Моделируя в программе ANSYS [4] процесс, получим рисунки распределения поля скоростей и плотностей газа (воздуха) при температуре 300 К (рис. 4, 5). Граничные условия: на выходе справа – давление равно нулю, на входе скорость равна 0,1 м/с пять раз из 50 итераций, т. е. с первой по пятую итерацию скорость равна 0,1 м/с, с шестой по пятидесятую скорость равна нулю, с 51-ой по 55-ую – 0,1 м/с, с 56-ой по 100-ую – нулю и т. д. Условие на стенке означает наличие сдвига (перетаскивания) и отсутствие нормального компонента скорости на границе, как при отсутствии сквозного потока.

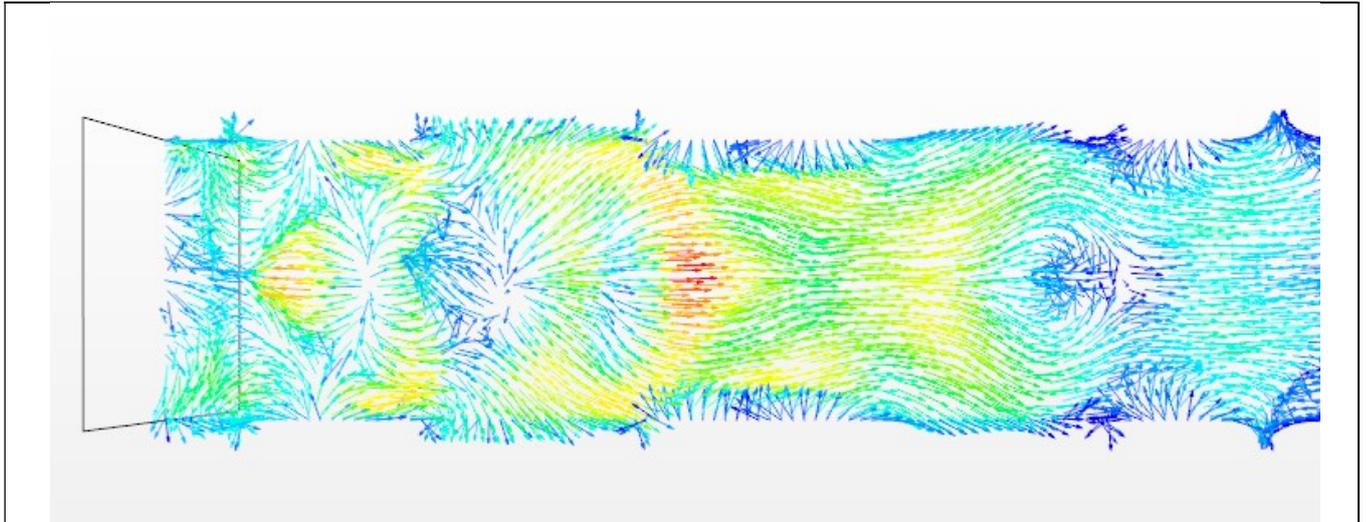


Рис. 5. Распределение скоростей вдоль поверхности линзы при турбулентных искажениях атмосферы. Слева поверхность линзы, вдоль оси  $y$  на расстояниях до 5 м показано распределение скорости воздуха. Вблизи линзы цвета, соответствующие наибольшим неравномерностям скорости (завихрения), а на расстоянии – распределение скоростей выравнивается

## Заключение

Таким образом, на рисунках наблюдаются ярко выраженные неравномерности плотности вблизи поверхности линзы. Эти неравномерности будут способствовать искажению траектории луча. Причем, поскольку в центре линзы наибольшая плотность воздуха, луч будет расщепляться, по крайней мере, на три луча. При этом плотность воздуха меняется от максимальной до минимальной в течение суток.

## 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. К. Н. Волков, В. Н. Емельянов. Аэрооптические эффекты в турбулентном потоке и их моделирование. ЖТФ. 2008. Том 78, вып 2. с. 77.
2. П. Г. Фрик. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Пермь. 1999 г.
3. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с. «Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений». Федеральное агентство Российской Федерации по образованию, Санкт-Петербургский

государственный политехнический университет, Физико-механический факультет, Кафедра гидроаэродинамики. Санкт–Петербург. 2010. (Конспект лекций).

4. Start Your Free Trial of Ansys Cloud Services. URL: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-cloud/free-trial> (17.05.2021).

### **Turbulence influence to optical signal propagation with wavelength 1550 nm**

Ognev B. I., Skladchikov S. A., Chulyaeva E. G.

<sup>1</sup> *Joint-Stock Company «MOSTCOM», Russia, Ryazan, [www.orcid.org/0000-0003-3088-2318](http://www.orcid.org/0000-0003-3088-2318)*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow, [www.orcid.org/0000-0002-7234-5644](http://www.orcid.org/0000-0002-7234-5644)*

<sup>3</sup> *Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, Russia, Ryazan, [www.orcid.org/000-0002-4459-3857](http://www.orcid.org/000-0002-4459-3857)*

In this work authors presents computational modeling results of optical signals passage near the receiving sites made in ANSYS program complex. Laser beam is split into several filaments due to the phenomenon of turbulence. Due to the fact that an uneven distribution of air refraction coefficients occurs near the receiving sites of optical signal receiving devices in the atmosphere, laser beams are split near the receiving sites. It means that requirements for the receiving sites of optical signals should be increased. To solve the problem with phenomenon of turbulence, several laser transmitters and receivers at different wavelengths should be installed in laser beam propagation installations. It increases the speed of information transfer and increases the reliability of the devices.

*Keywords:* turbulence, optical signals, laser radiation, beam path, optical beam splitting.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

doi: 10.51639/2713-0568\_2021\_1\_2\_17

УДК 551.510

ГРНТИ 29.31.27

### Лазерная система для исследования аэрозольных потоков методом дифференциального ослабления и рассеяния лазерного излучения в видимой и ближней ИК области

<sup>1</sup> Веденин Е. И., <sup>1</sup> Сарычев И. А., <sup>1</sup> Чартий П. В., <sup>2</sup> Чербачи Ю. В., <sup>\*1,2</sup> Шеманин В. Г.<sup>1</sup> 353900, Россия, г. Новороссийск, ул. Карла Маркса 20, Новороссийский политехнический институт (филиал) КубГТУ<sup>2</sup> 353919, Россия, г. Новороссийск, Мысхакское шоссе 75, Новороссийский филиал БГТУ им. В. Г. Шуховаemail: [pvc-60@yandex.ru](mailto:pvc-60@yandex.ru), [cherbachi-yu-v@nb-bstu.ru](mailto:cherbachi-yu-v@nb-bstu.ru), \* [shemanin-v-g@nb-bstu.ru](mailto:shemanin-v-g@nb-bstu.ru)

В работе построена автоматизированная многоволновая лазерная система для исследования зависимости лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля. Выполнены экспериментальные исследования зависимости лидарных сигналов от параметров функции распределения частиц цементного аэрозоля по размерам. Разработаны алгоритмы измерительных процедур и получены корреляционные зависимости измеренных экспериментально лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам.

*Ключевые слова:* лазерная система, длина волны лазерного излучения, лидарный сигнал, функции распределения частиц цементного аэрозоля по размерам.

### 1. Введение

Загрязнение атмосферного пограничного слоя над промышленными районами аэрозольными частицами очень актуально для юга России [1–4]. Учитывая повышенную роль атмосферного переноса в глобальном загрязнении контроль техногенной эмиссии особенно важен. Основная часть атмосферного загрязнения представлена аэрозолями различного происхождения. Эта роль аэрозолей в загрязнении атмосферы на юге России отмечалась неоднократно [5, 6] и заключается в том, что они не просто являются агентами загрязнения, но и сорбируют еще более мелкие частицы и молекулы на своей поверхности. Это характерно для наиболее тонкодисперсных аэрозолей, относящихся к классам PM10 и PM2.5 [7].

Методами лазерного зондирования установлены основные закономерности атмосферного аэрозоля, отмечена роль дефляции в образовании фонового аэрозоля и техногенных процессов - в появлении аномальных уровней загрязнения [5, 6, 8]. Эти аэрозоли характеризуются значительной полидисперсностью и высокими уровнями концентраций. Для контроля их параметров на сегодняшний день наибольшее распространение получили лазерные методы исследования аэрозолей [6, 8–10]. Такой выбор определен хорошо разработанной теорией распространения и взаимодействия электромагнитного излучения с различными средами и существованием большого количества промышленно выпускаемых разнообразных типов лазеров, оптических систем и их компонентов.

Существует много приборов, созданных для исследования параметров аэрозолей, однако большинство из них не отражают динамику характеристик объекта исследования и основаны на принципах пробоотбора. При использовании таких приборов необходимо при каждом измерении обеспечивать изокINETичность и представительность отобранной пробы, что неизбежно оказывает

влияние на исследуемую среду. Существующие приборы, основанные на бесконтактных методах измерений, как правило, не отображают динамики характеристик аэрозольного облака, не дают информации о размерах частиц в широком диапазоне или применимы лишь к конкретным типам аэрозолей, либо сложны в исполнении, что существенно ограничивает их использование.

Целью настоящей работы является разработка автоматизированной многоволновой лазерной системы для исследования зависимости лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля. Для этого будут разработаны алгоритмы измерительных процедур для регистрации концентраций аэрозольных частиц и выполнены экспериментальные исследования зависимости лидарных сигналов от параметров функции распределения аэрозольных частиц по размерам. Эти корреляционные зависимости измеренных экспериментально на автоматизированной многоволновой лазерной системе лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля.

## 2. Лазерный метод дифференциального ослабления

Для измерения параметров аэрозольных потоков была разработана лазерная система на основе метода дифференциального ослабления, позволяющая измерять сигналы ослабления на трех длинах волн. Сигналы ослабления представляют собой электрические сигналы фотоприемника прямо пропорциональные интенсивности ослабленного лазерного излучения.

Метод дифференциального ослабления основан на решении обратной задачи [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  $\tau_{\lambda}$  – оптическая плотность;  $C_n$  – счетная концентрация частиц;  $\lambda$  – 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:

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

Массовая концентрация взвешенных частиц через счетную 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 (3) счетной концентрации на массовую получаем выражение:

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

где  $\rho_p$  – плотность материала частиц.

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

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

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 [11, 13].

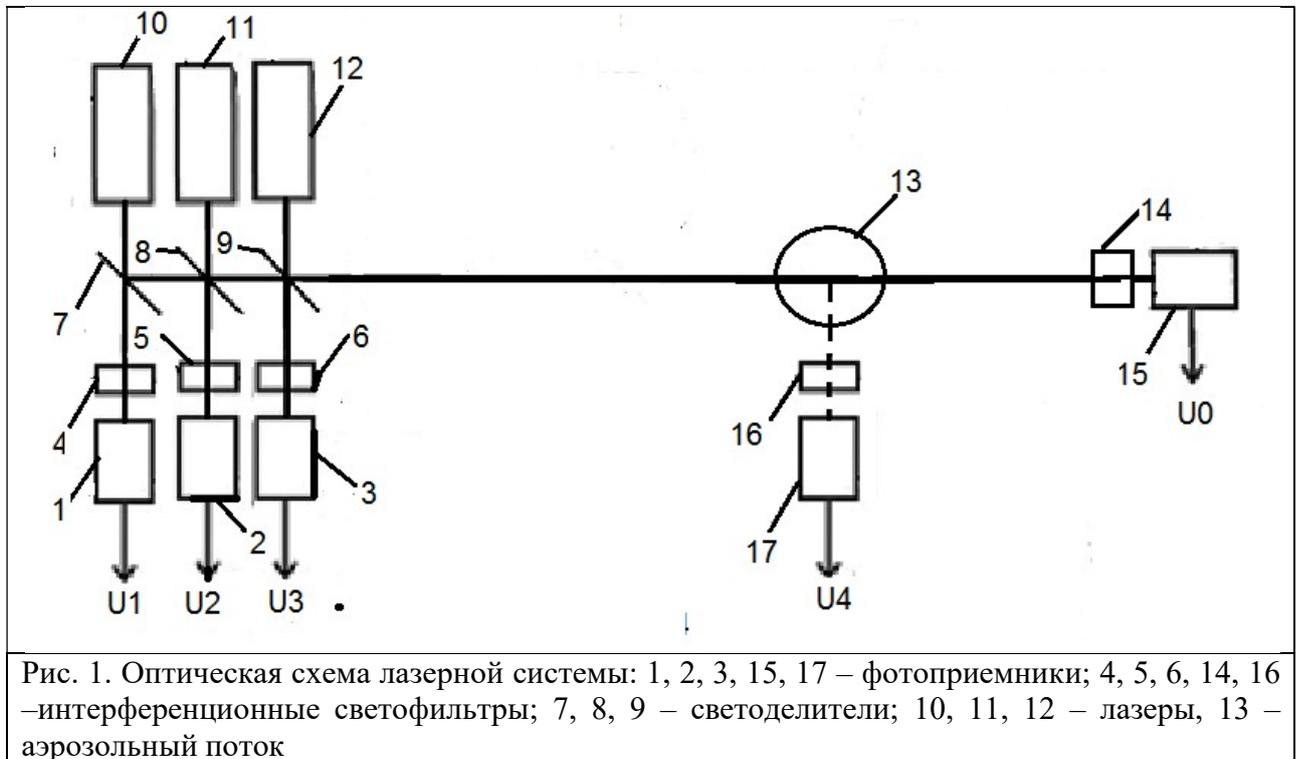
Средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных потоков определяется путем измерения оптической плотности исследуемого аэрозоля на нескольких длинах волн и вычисления усредненных факторов эффективности ослабления для этих длин волн. Отношение измеренных оптических плотностей на двух длинах волн равно отношению рассчитанных усредненных факторов эффективности ослабления и выражает функцию среднего размера частиц [11]:

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

Диапазон измерений средних размеров частиц определяется длинами волн зондирующего излучения.

## 3. Лазерная система для измерения концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц по дифференциальному ослаблению лазерного излучения

Для решения задачи восстановления функции распределения аэрозольных частиц по размерам и измерения их концентрации разработана экспериментальная лазерная система на основе моностатического лидара дифференциального ослабления и рассеяния Ми. Рассмотрим оптическую схему такой лазерной системы, представленную на рис. 1.



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. Как видно на рис. 2 для получения максимально объективной информации об инжектируемом аэрозоле кроме канала ослабления (фотоприемник ослабления 15) был использован канал рассеяния Ми излучения лазера 12 с фотоприемником 17, применяемые для определения ФРЧ и концентрации аэрозоля различными методами. Сигнал аэрозольного рассеяния Ми под углом  $90^\circ$  из измерительного объема 13, сформированного лабораторным генератором частиц цементного аэрозоля в воздушном потоке, регистрировался через интерференционный светофильтр 16 фотоприемником 17. Сигналы с выходов фотоприемников  $U_0$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и  $U_4$  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 Вт.

Блок сбора данных включает в себя блок формирования, регистрации и обработки сигналов, состоящий из измерительных и опорных синхронных детекторов, усилителя мощности и генератора импульсов [14]. Синхронное детектирование измерительных сигналов предназначено для повышения чувствительности фотоприемного устройства.

Лазерами 10, 11 и 12 генерируется излучение на трёх длинах волн (405, 532 и 1064 нм) с частотой  $5 \cdot 10^5$  Гц. С целью выделения в модулированном излучении нужных длин волн на пути лазерных лучей размещены интерференционные светофильтры 4, 5 и 6.

Последовательности импульсов лазерного излучения проходят через светоделительные пластины 7, 8 и 9. Часть прошедшего через светоделительные пластины 7, 8 и 9 излучения поступает на

опорные фотоприемники 1, 2 и 3, а основная часть излучения проходит сквозь аэрозольный поток 13.

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 15. 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 ослабленного излучения 15, где регистрируется.

Зарегистрированное фотоприёмником 8 излучение в форме электрических сигналов проходят через дифференциальный усилитель и синхронный детектор, после чего проходят повторное усиление дифференциальным усилителем. Электрический сигнал со второго дифференциального усилителя поступает на АЦП, где преобразуется в цифровой сигнал и далее поступает на обработку в ПК. Блок обработки сигналов использует шесть каналов аналогово-цифрового преобразователя.

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

#### **4. Экспериментальное исследование зависимости сигналов ослабления и рассеяния от среднего объемно-поверхностного диаметра частиц**

Экспериментальное исследование зависимости сигналов ослабления от массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц методами дифференциального ослабления и рассеяния Ми разработан экспериментальный генератор частиц цементного аэрозоля. Воздушный поток цементных частиц схожие по своим свойствам с потоками реального производства поступают в измерительный объем 13 перпендикулярно лазерному лучу (плоскости чертежа на рис. 1), а также изменяя параметры сгенерированных аэрозольных потоков исследовать зависимости лидарных сигналов от этих параметров.

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 (см. рис. 2).

Регистрация сигналов ослабления осуществлялась посредством аналого-цифрового преобразователя LA50USB подключенного к ПК [4]. Запись сигналов ослабления с фотоприемника осуществлялась в программе ADClab. Сигналы записывались в виде значений напряжения в вольтах и в таком виде использовались для дальнейшей обработки и проведения расчетов массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра аэрозольных частиц цемента.

Обработка измеренных сигналов заключается в усреднении, а для приведения графиков к первоначальному значению нулевого сигнала ликвидируется его смещение [7]. Графики сигналов ослабления, приведенные к первоначальному значению нулевого сигнала, представлены на рис. 2.

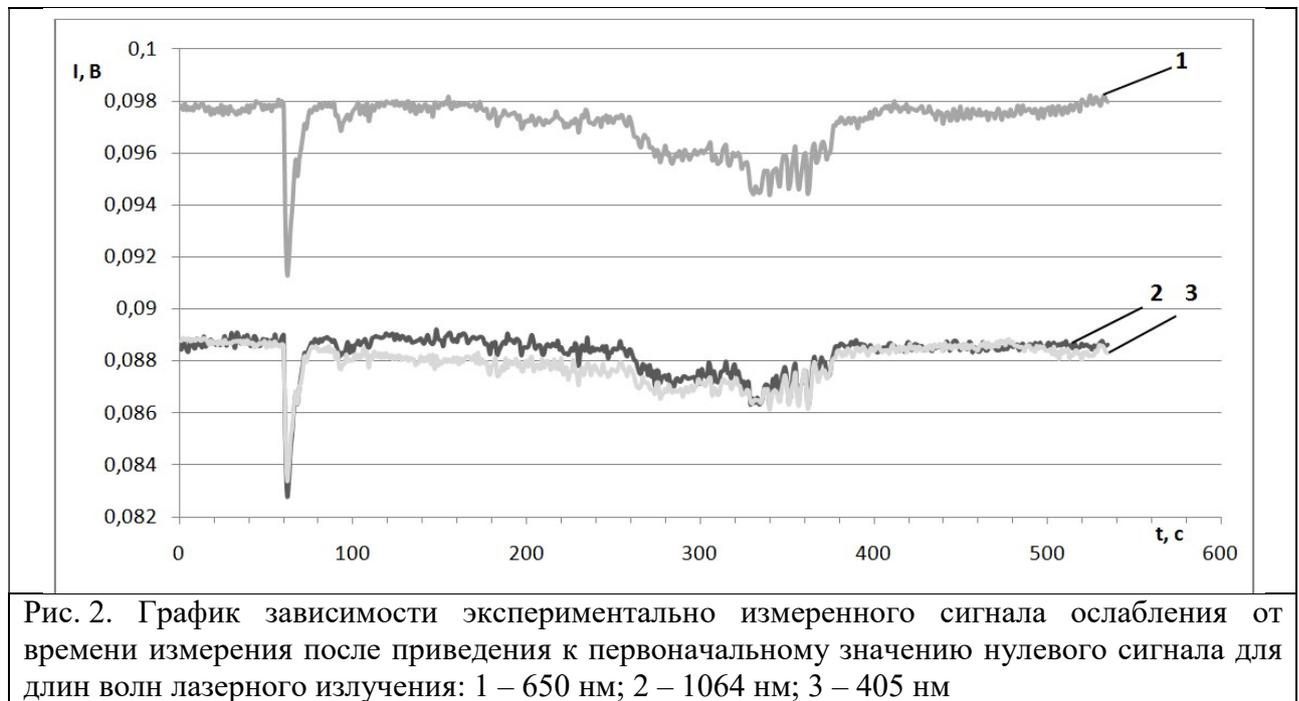


Рис. 2. График зависимости экспериментально измеренного сигнала ослабления от времени измерения после приведения к первоначальному значению нулевого сигнала для длин волн лазерного излучения: 1 – 650 нм; 2 – 1064 нм; 3 – 405 нм

На графике рис. 2 видно, что на участке от 165 до 400 с отмечается непрерывное ослабление сигнала в результате формирования устойчивого аэрозольного потока.

По полученным сигналам ослабления можно рассчитать массовую концентрацию и средний объемно-поверхностный диаметр частиц [4, 7, 10]. Оценим возможность расчета массовой концентрации по измеренным сигналам. Измеренная оптическая длина зондирования  $l$  составила 493 мм. Масса цементного порошка  $m$  впрыскиваемого в ходе экспериментального измерения объемом  $V = 0,6$  мл составляет в среднем 0,51 г [7].

Среднее рассчитанное значение коэффициента ослабления для сигнала на длине волны 650 нм составило  $k_{\kappa} = 0.174$ , для сигнала на длине волны 405 нм составило  $k_{\phi} = 0.250$ , для сигнала на длине волны 1064 нм составило  $k_{ин} = 0.137$ . По этим средним значениям коэффициента ослабления рассчитаем массу пробы для каждой серии измерения. Рассчитанные массы для длины волны 650 нм составили значения от 0,491 до 0,551 г ( $m_{ср} = 0,51$  г), для длины волны 405 нм от 0,480 до 0,542 г ( $m_{ср} = 0,51$  г), для длины волны 1064 нм от 0,489 до 0,594 г ( $m_{ср} = 0,51$  г). По результатам расчетов относительная погрешность определения массы пробы цемента составляет 1,6 %.

По измеренным сигналам ослабления рассчитаем средний объемно-поверхностный диаметр аэрозольных частиц цемента. Средний объемно-поверхностный диаметр можно определить, исходя из зависимости усредненного фактора эффективности ослабления от среднего объемно-поверхностного диаметра [14]. 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 кривые зависимости отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн от среднего объемно-поверхностного диаметра (рис. 4).

Исходя из формулы (6) 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. Для рассчитанных оптических плотностей на трех длинах волн были найдены отношения  $\tau_{\lambda_{650}}/\tau_{\lambda_{405}}$ ,  $\tau_{\lambda_{1064}}/\tau_{\lambda_{405}}$ ,  $\tau_{\lambda_{1064}}/\tau_{\lambda_{650}}$ . 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 значений  $d_{32}$  было рассчитано среднее значение, которое составило  $d_{32} = 0,61$  мкм с относительной погрешностью 6,5 %.

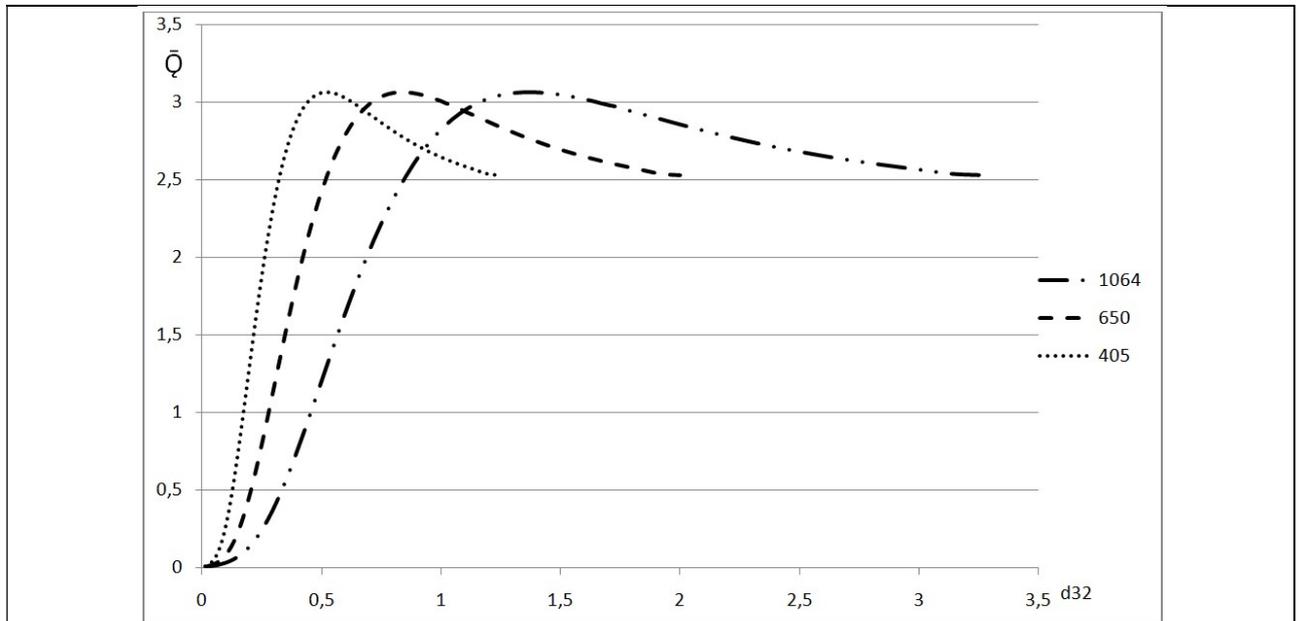


Рис. 3. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от усредненных факторов эффективности

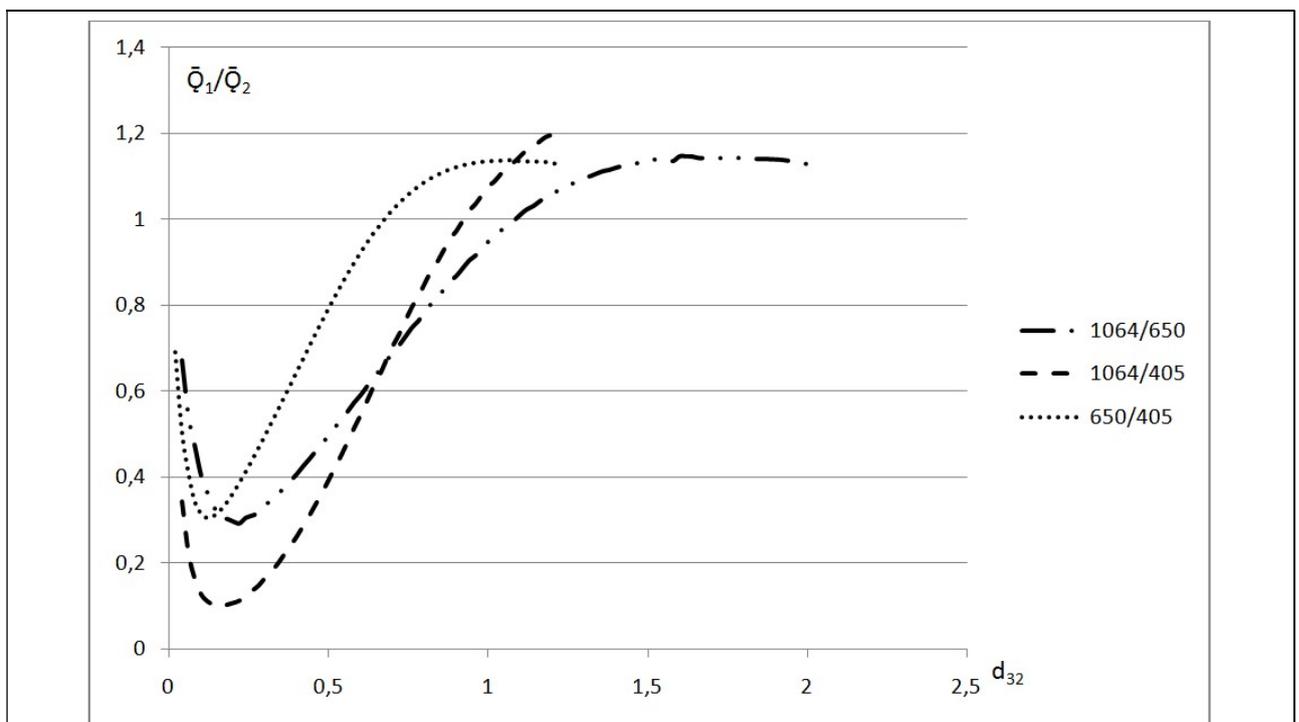
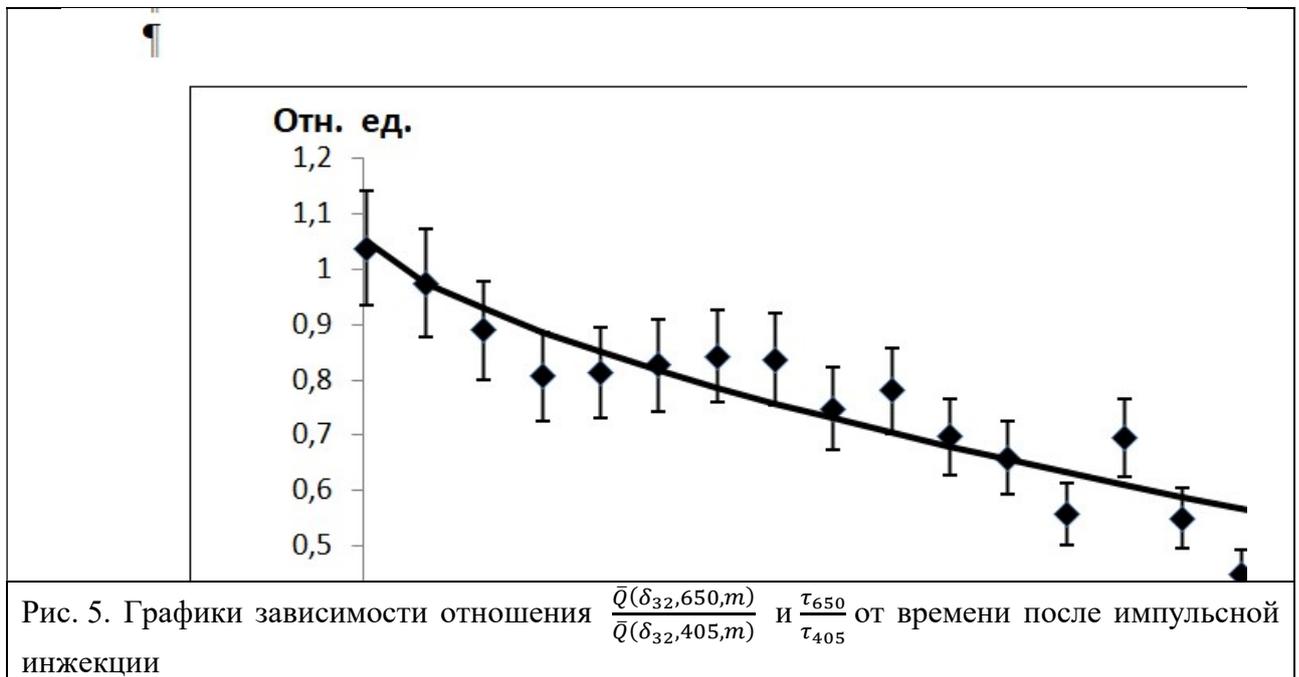


Рис. 4. Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра от отношения усредненных факторов эффективности на двух длинах волн

Затем было сопоставлено отношение  $\frac{\bar{Q}(\lambda_i)}{\bar{Q}(\lambda_j)}$  с экспериментально измеренным отношением  $\frac{\tau_{\lambda_i}}{\tau_{\lambda_j}}$ . На рисунке 3.6 показаны графики рассчитанного отношения  $\frac{\bar{Q}(\delta_{32,650,m})}{\bar{Q}(\delta_{32,405,m})}$  и измеренное отношение  $\frac{\tau_{650}}{\tau_{405}}$



По графикам на рис. 5 нетрудно заметить, что расчетное отношение  $\bar{Q}_{\lambda_i}/\bar{Q}_{\lambda_j}$  и экспериментальное отношение  $\tau_{\lambda_i}/\tau_{\lambda_j}$  совпадают в пределах заданной погрешности. Таким образом, по измеренному отношению оптических плотностей  $\tau_{\lambda_i}/\tau_{\lambda_j}$ , находим отношение усредненных факторов эффективности ослабления  $\bar{Q}_{\lambda_i}/\bar{Q}_{\lambda_j}$  и определяем величину  $d_{32}$ , пользуясь графиком на рис. 5. Таким образом, разработанная экспериментальная лазерная система позволяет измерять в реальном времени сигналы ослабления лазерного излучения и рассчитывать по измеренным сигналам ослабления достоверные значения массовой концентрации и среднего объемно-поверхностного диаметра частиц с достаточной точностью.

## 5. Регрессионные зависимости для функции распределения частиц по размерам

По результатам исследования трансформации функций распределения частиц по размерам в потоке были получены функции распределения частиц в аэрозольном потоке [7, 14]. Между измеренным средним объемно-поверхностным диаметром и остальными средними значениями диаметров установлены регрессионные зависимости с коэффициентом детерминации не менее 0,85. Аппроксимируя полученные функции распределения частиц логарифмически-нормальным законом, можно определить его параметры по полученным линейным зависимостям для максимума распределения и его полуширины

$$\begin{aligned} x_p &= 0,7723 \delta_{32} + 0,1430, \\ \sigma_p &= -1,2409 \delta_{32} + 0,9793. \end{aligned}$$

Таким образом, по этим результаты можно по измеренному среднему объемно-поверхностному диаметру возможно восстанавливать функцию распределения частиц по размерам для мелкодисперсного аэрозоля [15].

Предложенная методика определения среднего объемно-поверхностного диаметра по сигналам ослабления и рассеяния на трех длинах волн позволила выявить корреляционные зависимости между средним объемно-поверхностным диаметром и параметрами логарифмически-нормального закона распределения частиц по размерам, что подтверждено хорошим совпадением с экспериментальными данными [55].

## 6. Заключение

1 Создана экспериментальная автоматизированная четырехволновая лазерная система для измерения концентраций аэрозольных частиц и их распределения по размерам аэрозольных частиц в атмосферном пограничном слое по дифференциальному ослаблению и рассеянию лазерного излучения в видимой и ближней ИК области.

2 Разработаны алгоритмы измерительных процедур и соответствующее программное обеспечение для обработки данных лазерного зондирования [14, 15].

3 Получены корреляционные зависимости измеренных экспериментально лидарных сигналов от концентрации частиц и их распределения по размерам для зондируемого аэрозоля.

## 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.

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

## Список литературы

1. Дьяченко В. В. Региональные проблемы техносферной безопасности Северного Кавказа. Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 2. С. 32–37.
2. Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Изд. Лань. 2012. 288 с.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Изд «Химия», ЛО, 1969. 428 с.
4. Веденин Е. И. Чартий П. В., Шеманин В. Г. Лазерная система предупреждения аэрозольных выбросов. Безопасность в техносфере. 2014. № 5(50) сентябрь–октябрь. С. 25–31.
5. Донченко В. А., Кабанов М. В., Кауль Б. В., Самохвалов И. В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ. 2010. 220 с.
6. 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.
7. 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.
8. Зуев В. Е., Наац И. Э. Обратные задачи оптики атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1990. 287 с.
9. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Учет ширины линии лазерного излучения в лидарном уравнении для комбинационного рассеяния света. Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 9. С. 11–15.
10. Архипов В. А. Лазерные методы диагностики гетерогенных потоков. Томск : Изд-во Томского ун-та. 1987. 140 с.
11. 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, № 01. С. 48–52.
12. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир. 1986. 660 с.
13. Пришивалко А. П. Рассеяние света сферическими частицами и полидисперсными средами. А. П. Пришивалко, Е. К. Науменко: препринт ИФ АН БССР. Минск. 1972. Ч. 1. 61 с.
14. 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.
15. Половченко С. В. Оптические характеристики полидисперсных систем в широком диапазоне изменения входящих параметров. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621475 от 22 октября 2014.

## **Laser system for investigating aerosol flows by the method of differential attenuation and scattering of laser radiation in the visible and near-infrared regions**

<sup>1</sup> Vedenin E. I., <sup>1</sup> Sarychev I. A., <sup>1</sup> Chartiy P. V., <sup>2</sup> Cherbachi Yu. V., <sup>\*1,2</sup> Shemanin V. G.

<sup>1</sup> *Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) KubSTU, 353900, Russia, Novorossiisk, Karl Marx st. 20*  
<sup>2</sup> *Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia, Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

The controlled multi-wavelength laser system has been built In this work to study the lidar signal dependence on the particles concentration and their size distribution function for the remote sensed aerosol. The experimental studies of these dependence on the cement aerosol particle size distribution function parameters have been carried out. The measurement procedures algorithms were developed and correlation dependences of the experimentally measured lidar signals on the particles concentration and their size distribution were obtained.

*Keywords:* laser system, laser radiation wavelength, lidar signal, size distribution functions, cement aerosol particles.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568\_2021\_1\_2\_26

УДК 53.08, 535.2

ГРНТИ 29.03.45, 29.03.77, 29.31.27, 29.33.47

### Метод определения динамики оптической прочности материалов

Чунгурова Т. Л., \* Мкртычев О. В.

353919, Россия, г. Новороссийск, Мыхакское шоссе 75, Новороссийский филиал БГТУ им. В. Г. Шухова

email: [chungurova-t-l@nb-bstu.ru](mailto:chungurova-t-l@nb-bstu.ru), \* [mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru](mailto:mkrtychev-o-v@nb-bstu.ru)

В данной работе рассмотрены результаты экспериментальных исследований прочности различных оптических материалов (стёкол, кристаллов, волоконно-оптических элементов и т. п.) и результаты математического моделирования, позволяющие прогнозировать динамику оптической прочности. Описан метод определения динамики прочности оптических материалов.

*Ключевые слова:* оптическая прочность, надёжность оптических материалов, динамика прочности.

Авторами проведены экспериментальные исследования прочности различных оптических материалов. На базе этих экспериментов проведено математическое моделирование динамики оптической прочности [1–8]. Оптическая прочность материалов, особенно в силовой оптике, является важной характеристикой материала. Различая различные виды прочности оптических материалов (термоупругое разрушение, разрушение вследствие разогрева дефектов и пробой в поле световой волны), рассмотрим оптическую прочность материалов при лазерной абляции. В данном случае вероятность разрушения, определяемая случайным распределением дефектов в облучаемой поверхности, традиционно записывается в виде:

$$p(F) = 1 - e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0,5}}\right)^m},$$

откуда

$$\ln \left( \frac{\ln \frac{1}{1-p}}{\ln 2} \right) = m \ln \left( \frac{F}{F_{0,5}} \right).$$

Этой функции соответствует интегральная функция трёхпараметрического распределения Вейбулла–Гнеденко относительно переменной величины  $x = F$  с параметрами:  $a = 0$ ,  $b = \frac{F_{0,5}}{m \sqrt{\ln 2}}$  и  $c = m = \text{const}$ . В частности, в случае однократно облучённой мишени, при условии, что вероятность лазерной абляции определяется дефектами одного рода на поверхности образца, вероятность разрушения может быть описана показательной функцией типа

$$p(F) = \begin{cases} 1 - e^{-\rho(F)A} = 1 - e^{-kA} m = 1 - e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0,5}}\right)^m}, & F > 0, \\ 0, & F \leq 0, \end{cases}$$

где  $\rho(F) = kF^m$  – средняя поверхностная концентрация дефектов, и  $A$  – площадь области, подвергнутой воздействию лазерного излучения с плотностью энергии  $F$ ,  $F_{0,5}$  – пробойная энергия, для которой вероятность пробова равна 0,5.

На основании полученных экспериментальных данных были выполнены расчёты. Результаты вычислений показывают, что значения показателя экспоненты  $m$  в формуле (1) группируются вокруг некоторых опорных значений, большинство из которых лежит в наиболее распространённом для стекол типичном диапазоне 4...15. На рис. 1 показаны графики этой

интегральной функции распределения Вейбулла–Гнеденко для для некоторых пар значений параметров  $m$  и  $F_{\max}$ :

$m$ (безразм.)	3,62	7,74	13,14	34,50
$F_{\max}$ (Дж·см <sup>-2</sup> )	119,85	128,54	141,86	116,27

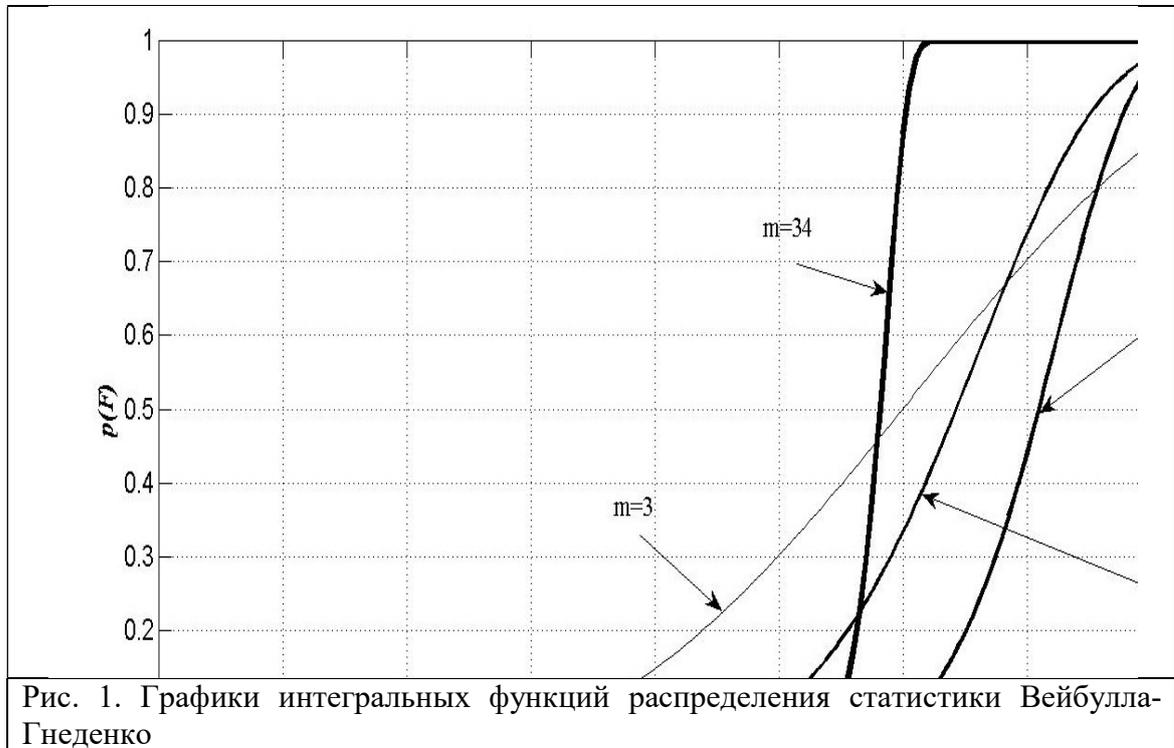


Рис. 1. Графики интегральных функций распределения статистики Вейбулла-Гнеденко

По этим графикам можно прогнозировать надёжность образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объёма экспериментальных измерений. Кроме того, эти результаты могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерного абляционного разрушения для любых образцов [10–18]. Оптическая прочность покрытия детали определяет функцию вероятности разрушения покрытия в зависимости от величины плотности энергии падающего излучения и имеет вид:

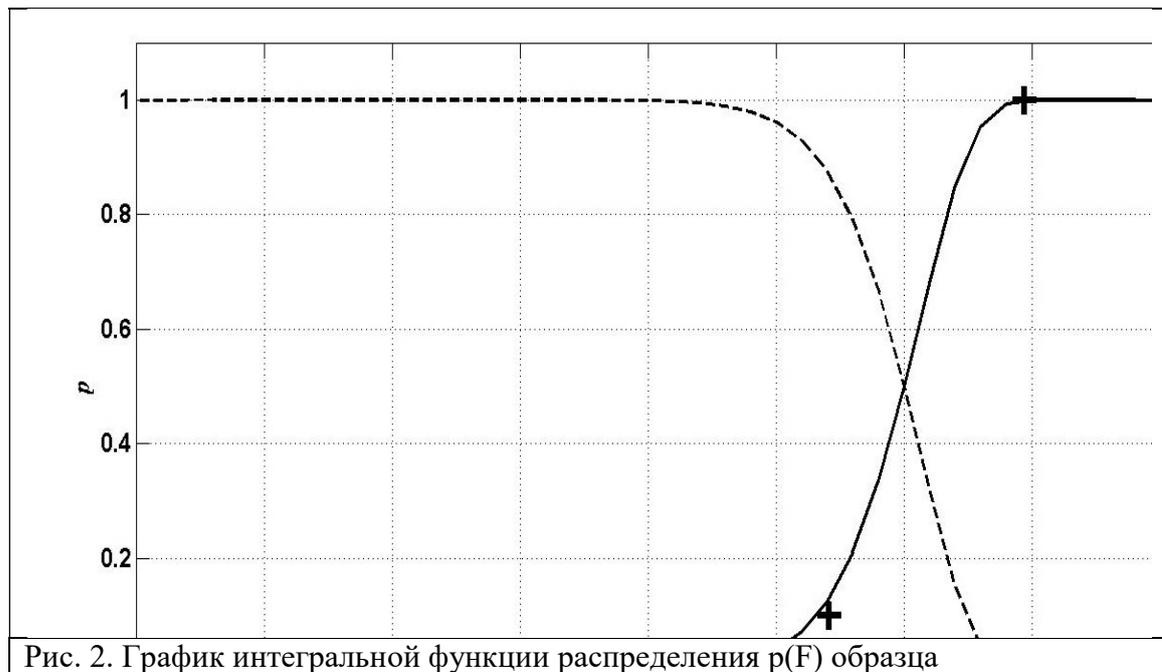
$$R(F) = 1 - p(F) = e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0,5}}\right)^m}.$$

Для примера на рис. 2 показаны результаты вычислений одного из образцов в наносекундном диапазоне: «+» – экспериментальные точки, сплошная кривая – аппроксимация функцией распределения Вейбулла-Гнеденко, оптическая прочность – штриховая линия

Результаты проведённых исследований можно применить для прогнозирования оптической прочности образца при его многократном облучении импульсным лазерным излучением. При частоте  $f$  следования лазерных импульсов получаем оптическую прочность образца за время  $t$ :

$$R_t(F) = e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0,5}}\right)^{mft}}.$$

Параметры  $F_{0,5}$  и  $m$  определяются по результатам экспериментов, а частота следования лазерных импульсов  $f$  задаётся.



### 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. Мкртычев О. В. Методика определения лучевой прочности материалов при однократном облучении. Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Т. 1. № 1(1). С. 7–13. URL: [https://doi.org/10.51639/27130568\\_2021\\_1\\_1\\_7](https://doi.org/10.51639/27130568_2021_1_1_7).
2. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Способ определения оптической прочности материалов при однократном облучении. Патент на изобретение RU 2694073 C1, 09.07.2019. Заявка № 2018110756 от 26.03.2018.
3. O. V. Mkrtychev 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1327 012037. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1327/1/012037/pdf>
4. Мкртычев О. В. Моделирование параметров разрушения твердого тела при лазерной абляции. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018666503, 18.12.2018. Заявка № 2018663452 от 18.11.2018.
5. Привалов В. Е., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Метод оценки оптической прочности облучаемой поверхности при лазерной абляции. Измерительная техника. 2018. № 7. С. 34–37. URL: [http://izmt.ru/note.php?type=TAMI\\_izmt&notes\\_id=281](http://izmt.ru/note.php?type=TAMI_izmt&notes_id=281)
6. Мкртычев О. В. Прогнозирование лучевой прочности наноразмерных покрытий. Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2018. № 3. С. 24–32.
7. Мкртычев О. В., Привалов В. Е., Фотиади А. Э., Шеманин В. Г. Лазерная абляция нанокompозитов. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2015. № 1(213). С. 128–135. URL: <https://physmath.spbstu.ru/article/2015.27.13/>
8. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Прогнозирование оптической прочности нанокompозитов. Петербургский журнал электроники. 2014. № 3 (80). С. 13–22.
9. Atkarskaya A. B., Privalov V. E., Shemanin V. G., Mkrtychev O. V. Laser ablation of the glass nanocomposites studies. Optical Memory and Neural Networks. 2014. V.23, Issue 4. p. 265–270.
10. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции. УФН. 2002. Т. 172, № 3. С. 301–333.

11. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твёрдых тел лазерными импульсами разной длительности. Квантовая электроника. 2002. Т. 32, № 4. С. 335–340.
12. Бессараб А. В., Кормер С. Б., Павлов Д. В., Фунтиков А. И. Статистические закономерности поверхностного разрушения оптического стекла под действием широких пучков лазерного излучения. Квантовая электроника. 1977. Т. 4, № 2. С. 328–334.
13. Алешин И. В. и др. Оптический пробой прозрачных сред, содержащих неоднородности. ЖЭТФ. 1976. Т. 70, вып.4. с.12–14.
14. Кортов В. С., Перлов Д. И., Шифрин В. П. О взаимосвязи параметров экзоэмиссии с лучевой стойкостью элементов ОКГ. Квантовая электроника. 1976. Т. 3, № 5. С. 1143–1145.
15. O. Connel. Single and multip.-shot laser damage properties of commercial grade PMMA. Appl. Optics. 1984. V. 23, N 5. p. 682–688.
16. Патент № 2034245, Российская Федерация, G01J 5/50. Способ определения предела оптической прочности материала. В. А. Петров, А. Е. Чмель, А. М. Кондырев; патентообладатель Петров А. В. Заявл. 26.11.1991; опубл. 30.04.1995.
17. Патент № 2034245, Российская Федерация, G01B 7/34 G01N 23/22. Способ контроля лучевой прочности поверхности оптических материалов. Л. Б. Глебов, А. Ф. Зацепин, В. С. Кортов, Н. В. Никоноров, В. В. Тюков, В. И. Ушкова; патентообладатель Уральский государственный технический университет. Заявл. 26.12.1990; опубл. 30.04.1995.
18. Патент № 2430352, Российская Федерация, G01N 17/00. Способ определения лучевой прочности поверхности оптической детали. Д. И. Дмитриев, И. В. Иванова, В. Н. Пасункин, В. С. Сиразетдинов; патентообладатель федеральное государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП) (RU). Заявл. 28.11.2010; опубл. 27.09.2011.

### **Method for determining the dynamics of optical strength of materials**

Chungurova T. L, Mkrtychev O. V.

*Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia,  
 Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

This paper considers the results of experimental studies of the strength of various optical materials (glasses, crystals, fiber-optic elements, etc.) and the results of mathematical modeling of predicting the dynamics of optical strength. A method for determining the dynamics of the strength of optical materials is described.

*Keywords:* optical strength, reliability of optical materials, strength dynamics.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

doi: 10.51639/2713-0568\_2021\_1\_2\_30

УДК 535.21, 535.23

ГРНТИ 29.31.27, 29.33.47

OCIS 140.3440, 140.3390, 160.3380

### Сравнение значений пробойной энергии при различных длительностях лазерного импульса

Чербачи Ю. В., \* Мкртычев О. В.

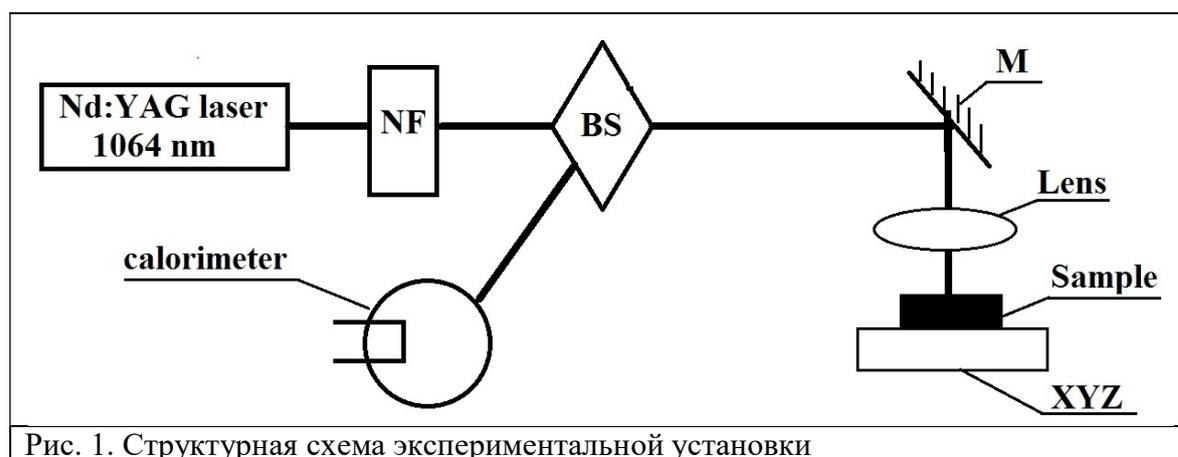
353919, Россия, г. Новороссийск, Мысхакское шоссе 75,  
Новороссийский филиал БГТУ им. В. Г. Шухова

email: [cherbachi-yu-v@nb-bstu.ru](mailto:cherbachi-yu-v@nb-bstu.ru), \* [mkrtchev-o-v@nb-bstu.ru](mailto:mkrtchev-o-v@nb-bstu.ru)

Сравнение результатов лазерной абляции при импульсах различной длительности необходимо для создания в будущем материалов силовой оптики. Исследования, проводимые авторами данной статьи, рассматривали оптический пробой материала лазерами микросекундной и наносекундной длительностей. Для лазерных импульсов фемтосекундной длительности привлекались значения из работ других исследователей.

*Ключевые слова:* оптический пробой, модель Вейбулла–Гнеденко, микросекундная длительность, наносекундная длительность, фемтосекундная длительность.

Структурная схема экспериментальной установки, на которой проводились измерения, приведена на рис. 1 [1]. Методика эксперимента описана в [2–4]. Эксперименты проводились с импульсами различной длительности. Энергия в импульсе калибровалась с помощью нейтральных светофильтров. В качестве мишеней использовались стеклянные образцы, покрытые плёнками диоксида гафния.



На рис. 2 и 3 приведены результаты, полученные при облучении четырёх образцов импульсами микросекундной и наносекундной длительностей. По оси абсцисс отложены значения плотности потока энергии лазерного импульса в относительных единицах, нормированные на максимальную энергию лазерного импульса, по оси ординат – вероятность пробоя. Экспериментальные значения вероятности пробоя для четырёх образцов отмечены ромбами, квадратами, треугольниками и крестами. Сплошными линиями на рисунках показаны линия средних и линия аппроксимации этих значений моделью Вейбулла–Гнеденко:

$$p(F) = \begin{cases} 1 - e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0,5}}\right)^m}, & F > 0 \\ 0, & F \leq 0, \end{cases}$$

т. е., модели, в которой мишень подвергнута воздействию лазерного излучения с плотностью энергии  $F$ , где  $F_{0,5}$  – пробойная энергия, для которой вероятность пробоя равна 0,5.

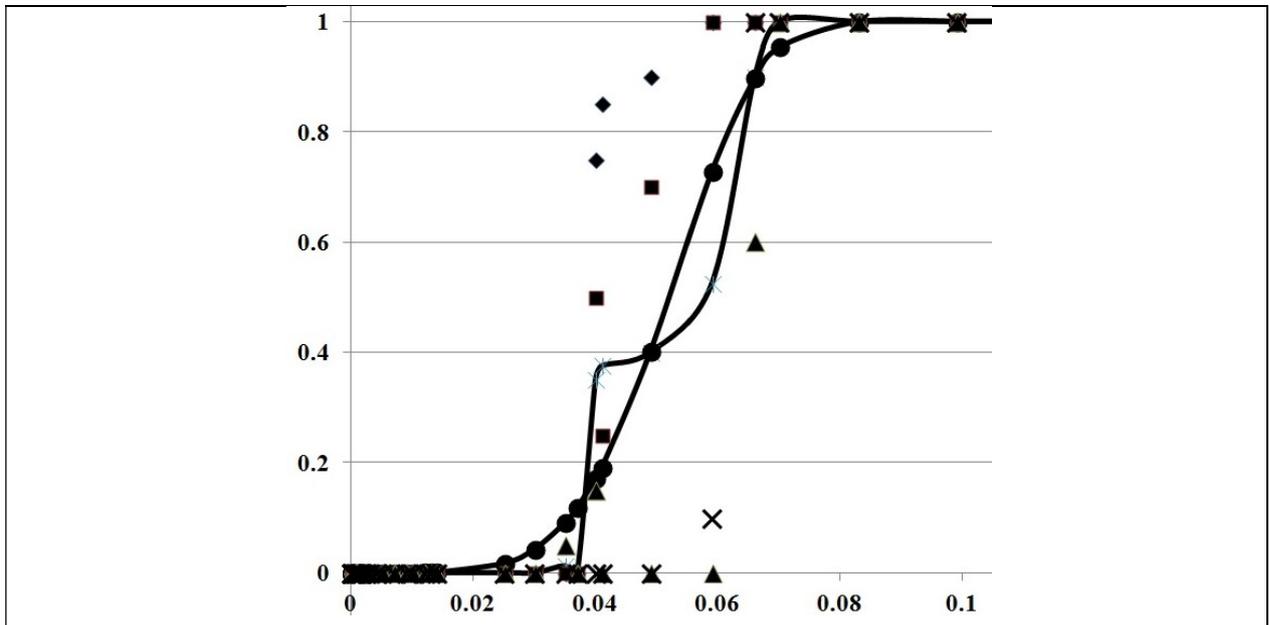


Рис. 2. График вероятности оптического пробоя исследуемых образцов при длительности лазерного импульса 300 мкс

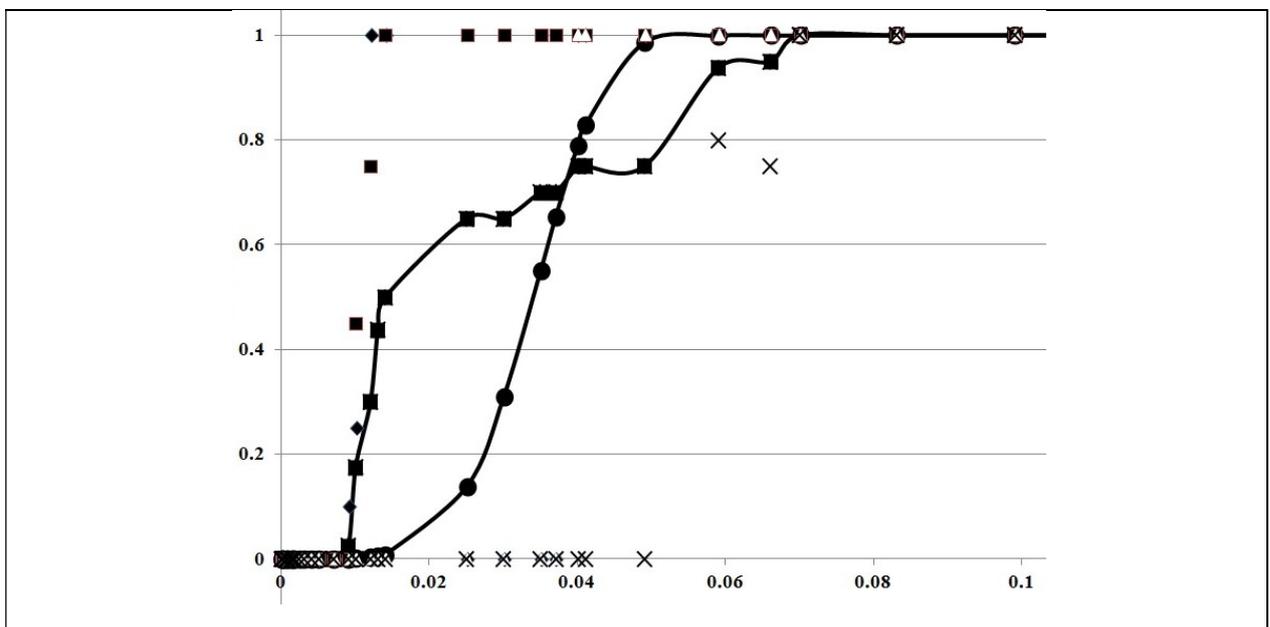


Рис. 3. График вероятности оптического пробоя исследуемых образцов при длительности лазерного импульса 20 нс

Сравнение результатов лазерной абляции при импульсах различной длительности необходимо для создания в будущем .....

Исследования, проводимые авторами данной статьи, рассматривали оптический пробой материала лазерами микросекундной и наносекундной длительностей. Для фемтосекундной длительности брались результаты исследований, проведенных коллективом авторов из Шанхайского института оптики и точной механики и Пекинского университета Китайской академии наук [5]. Во всех случаях подвергались облучению мишени, представляющие плёнки диоксида гафния на стеклянной матрице.

В качестве опорных значений выбраны значения  $F_{0,5}$  плотности потока энергии лазерного импульса для микросекундной и наносекундной длительности импульса [1–4], а для фемтосекундной авторы [5] использовали несколько другую величину, рекомендованную стандартом ISO 21254 [6]. Это замечание следует учитывать при использовании значений, приведённых в нижеследующей таблице:

Длительность импульса	300 мкс	20 нс	70 фс
Пробойная плотность, Дж·см <sup>-2</sup>	8,4	3,1	0,35

### 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. [O. V. Mkrtychev](#), [V. G. Shemanin](#), and [Yu. V. Shevtsov](#) "Investigation of laser ablation destruction of polymer materials", Proc. SPIE 11322, XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 1132221 (11 December 2019); <https://doi.org/10.1117/12.2555980>
2. Мкртычев О. В. Методика определения лучевой прочности материалов при однократном облучении. Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Т. 1. № 1(1). С. 7–13. URL: [https://doi.org/10.51639/27130568\\_2021\\_1\\_1\\_7](https://doi.org/10.51639/27130568_2021_1_1_7).
3. Мкртычев О. В., Шеманин В. Г. Способ определения оптической прочности материалов при однократном облучении. Патент на изобретение RU 2694073 С1, 09.07.2019. Заявка № 2018110756 от 26.03.2018.
4. Привалов В. Е., Шеманин В. Г., Мкртычев О. В. Метод оценки оптической прочности облучаемой поверхности при лазерной абляции. Измерительная техника. 2018. № 7. С. 34–37. URL: [http://izmt.ru/note.php?type=TAMI\\_izmt&notes\\_id=281](http://izmt.ru/note.php?type=TAMI_izmt&notes_id=281)
5. Zehan Li, Juan Du, Yuanan Zhao, Yueliang Wang, Yuxin Leng, and Jianda Shao. Modeling the effect of nanosecond laser conditioning on the femtosecond laser-induced damage of optical films. Optics Express. Vol. 23, Issue 11, pp. 14774–14783 (2015). URL: <https://doi.org/10.1364/OE.23.014774>
6. ISO 21254, Laser and laser-related equipment—Test methods for laser-induced damage threshold, (2011).

### Comparison of breakdown energy values at different laser pulse durations

Cherbachi Yu. V., Mkrtychev O. V.

*Novorossiysk Branch of Belgorod V G Shukhov State Technology University, 353919, Russia,  
 Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75*

Comparison of the results of laser ablation with pulses of different durations is necessary for the development of power optics materials in the future. The studies carried out by the authors of this article considered the optical breakdown of the material by lasers of microsecond and nanosecond duration. For femtosecond laser pulses, we used the values from the works of other researchers.

*Keywords:* optical breakdown, Weibull–Gnedenko model, microsecond duration, nanosecond duration, femtosecond duration.