

## 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

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

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

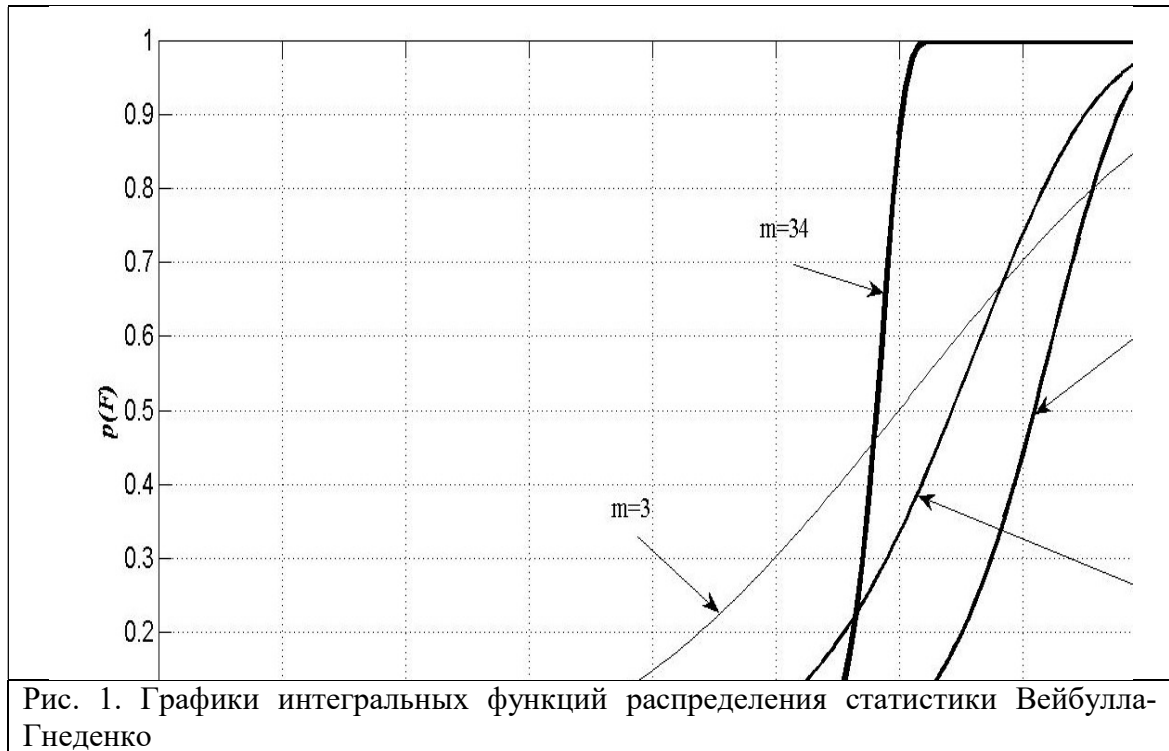


Рис. 1. Графики интегральных функций распределения статистики Вейбулла-Гнеденко

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:

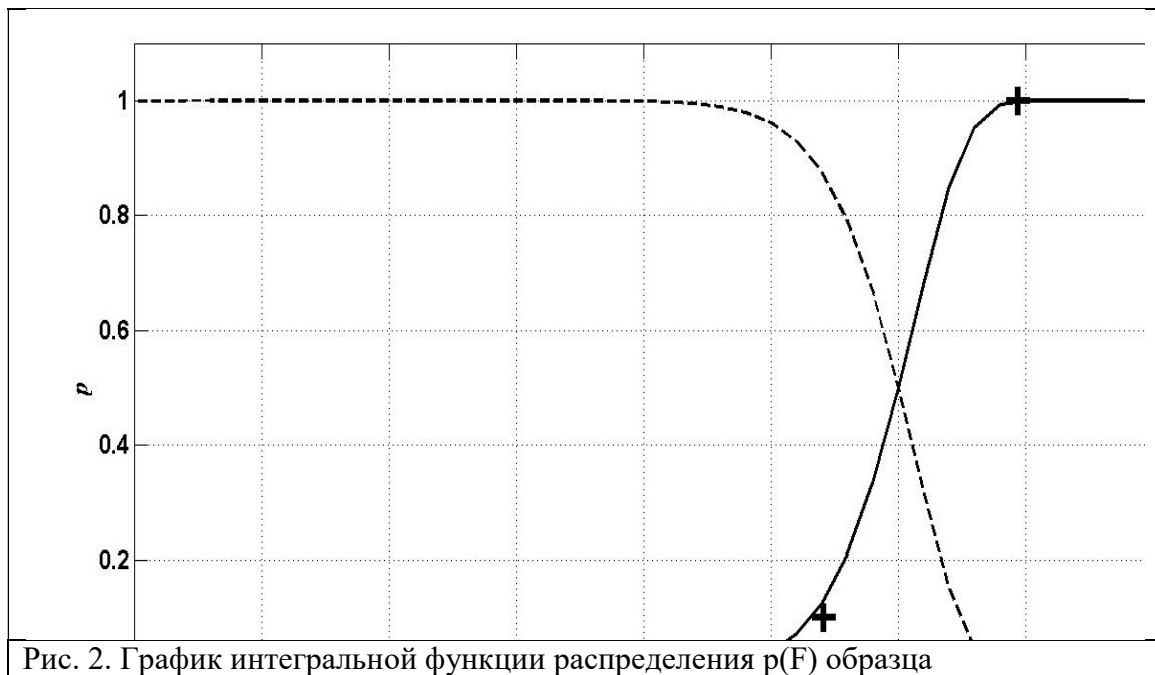
$$R(F) = 1 - p(F) = e^{-\ln 2 \left(\frac{F}{F_{0,5}}\right)^m}.$$

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.

Рис. 2. График интегральной функции распределения  $p(F)$  образца

### 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.