

УДК 621.9.044

DOI: 10.30987/article_5c129144c6a4a9.23490975

В.В. Васильцов, д.т.н.,
А.В. Богданов, к.т.н., **Ю.В. Голубенко**, к.т.н.,
Д.В. Вагин, студент, **А.П. Симонов**, студент
(ФГБОУ ВО МГТУ имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1)
E-mail: mtbmstu@bmstu.ru

Инженерный расчет фокусирующей системы волоконного лазера

Получена формула для определения диаметра пятна сфокусированного лазерного излучения при известных параметрах качества луча BPP и M^2 . Представлена формула для определения оптимального фокусного расстояния оптического тракта волоконного лазера. Построена номограмма для определения оптимального значения фокусного расстояния оптической системы волоконного лазера.

Ключевые слова: лазерно-оптическая система; оптимальное фокусное расстояние; диаметр пучка лазерного излучения; волоконный лазер.

V.V. Vasiltsov, Dr. Sc. Tech.,
A.V. Bogdanov, Can. Sc. Tech, **Yu.V. Golubenko**, Can. Sc. Tech.,
D.V. Vagin, Student, **A.P. Simonov**, Student
(FSBEI HE Bauman STU of Moscow (National Research University),
Building, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

Engineering computation of fiber laser focusing system

A formula for the diameter definition of the spot of focused laser emission at the known quality parameters of BPP and M^2 ray is obtained. A formula for the definition of the optimum focal distance of an optical path in a fiber laser is presented. An alignment chart is formed for the definition of the optimum value of the focal distance of the optical system in a fiber laser.

Keywords: laser-optical system; optimum focal distance; beam diameter of laser emission; fiber laser.

Введение

При проектировании оптических систем для сварки, резки, маркировки, как правило, перед разработчиками стоит задача получения минимального диаметра пятна в фокусе. Это необходимо для определения наиболее узкого реза, «кинжального проплавления», уменьшения зоны термического влияния, увеличения разрешения изображения при маркировке и т.п. Решение этой задачи заключается в оптимизации оптической системы по фокусному расстоянию. Оптимизирование производится

путём поиска оптимального фокусного расстояния при данных характеристиках фокусирующей системы, которые определяются конструктивными параметрами и материалами элементов системы, при которых диаметр пятна фокуса минимален. При этом достигается максимальная концентрация энергии [1].

Расчет оптимального фокусного расстояния

Размер пятна в плоскости наилучшей установки можно представить как сумму двух сла-

гаемых [2]: первое – абберационная составляющая диаметра пятна d_a ; второе – дифракционная составляющая диаметра пятна d_θ , мм:

$$d_{\Pi} = d_a + d_\theta. \quad (1)$$

Эту зависимость можно представить в виде графика, представленного на рис. 1.

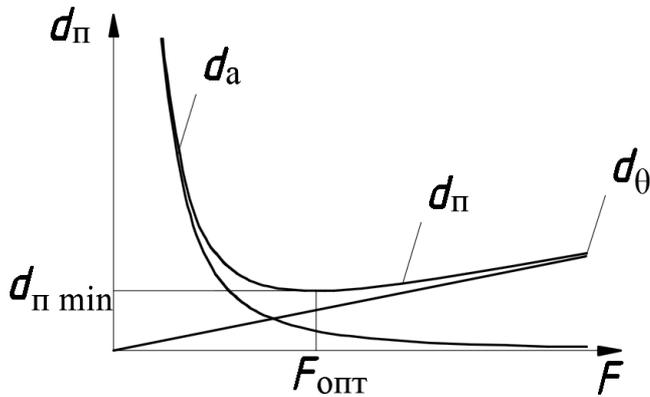


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна от фокусного расстояния

Как видно из графика, минимальный диаметр пятна $d_{\Pi \min}$ получается при оптимальном фокусном расстоянии системы $F_{\text{опт}}$ (графическое решение уравнения (1)).

По методике расчета, представленной в работе [2], диаметр пятна при известной расходимости $\theta_{0,868}$ лазерного пучка вычисляется по формуле

$$d_{\Pi \min} = \frac{PD^3}{32F_{\text{опт}}^2} + \theta_{0,868}F_{\text{опт}}. \quad (2)$$

Данный аппарат применим для лазерных установок, показателем качества излучения которых является угловая расходимость $\theta_{0,868}$. Для оценки качества лазерного излучения современных волоконных лазеров используются такие параметры, как Beam Parameter Product (BPP), определяющийся как произведение радиуса пучка в плоскости перетяжки на его угловую расходимость в дальнем поле, и M^2 [3, 4]:

$$BPP = W_0\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi}M^2.$$

В этом соотношении W_0 – радиус перетяжки; θ_0 – угол расходимости в дальней зоне; λ – длина волны лазерного излучения; M^2 – безразмерный параметр, определяющий для реального пучка и идеального Гауссова пучка моды TEM₀₀ различие произведений диаметра перетяжки и угловой расходимости. Для иде-

ального Гауссова пучка $M^2 = 1$, а для реального – $M^2 > 1$.

В данной работе представлена формула для расчета диаметра пятна, и соотношение для определения оптимального фокусного расстояния при известном качестве пучка, диаметра транспортного волокна и фокусного расстояния коллиматора.

Дифракционную составляющую при известных параметрах BPP или M^2 вычисляют по следующим формулам [5, 6]:

$$d_{BPP} = \frac{4F \cdot BPP}{D}; \quad (3)$$

$$d_{M^2} = \frac{4FM^2\lambda}{D\pi}. \quad (4)$$

Подставляя дифракционную составляющую (3) в формулу (2), получаем выражение для определения диаметра пятна при известном BPP:

$$d_n = \frac{PD^3}{32F^2} + \frac{4F \cdot BPP}{D}.$$

Подставляя дифракционную составляющую (4) в формулу (2), получаем выражение для определения диаметра пятна при известном M^2 :

$$d_{\Pi} = \frac{PD^3}{32F^2} + \frac{4FM^2\lambda}{D\pi},$$

где P – абберационный параметр линзы, зависящий только от формы и материала линзы; D – диаметр лазерного луча на коллиматоре; F – фокусное расстояние линзы.

Диаметр лазерного луча на линзе коллиматора D вычисляют по формуле

$$D = 4 \frac{F_k}{d_v} BPP,$$

диаметр перетяжки принимается равным диаметру волокна [6, 7].

При известном M^2 :

$$D = 4 \frac{F_k}{d_v} \frac{M^2\lambda}{\pi},$$

где F_k – фокусное расстояние коллимирующей линзы; d_v – диаметр волокна.

Исходя из того, что отношение F_k / d_v может принимать одинаковые значения при разных параметрах оптической системы, заменим его безразмерным параметром $X = F_k / d_v$, тогда окончательная формула примет вид:

$$D = 4X \cdot BPP.$$

При известном M^2 :

$$D = 4X \frac{M^2 \lambda}{\pi}.$$

Таким образом, получена формула для определения диаметра пятна $d_{\text{п}}$ при известных параметрах оптической системы, качества пучка и диаметра транспортного волокна.

Значение оптимального фокусного расстояния можно определить по следующей формуле

$$F_{\text{opt}} = \sqrt[3]{4P \cdot X^3 BPP^3};$$

При известном M^2 :

$$F_{\text{opt}} = \sqrt[3]{4P \cdot X^3 \left(\frac{M^2 \lambda}{\pi} \right)^3}.$$

Формулы описывают поверхность значений оптимального фокуса для различных комбинаций параметров X и BPP или M^2 соответственно.

На практике доступны определенные фокусные расстояния [8]. Поэтому удобно построить линии уровня, соответствующие доступным фокусным расстояниям. На рис. 2, построенном с помощью системы Mathcad, представлены линии уровня для некоторых фокусных расстояний.

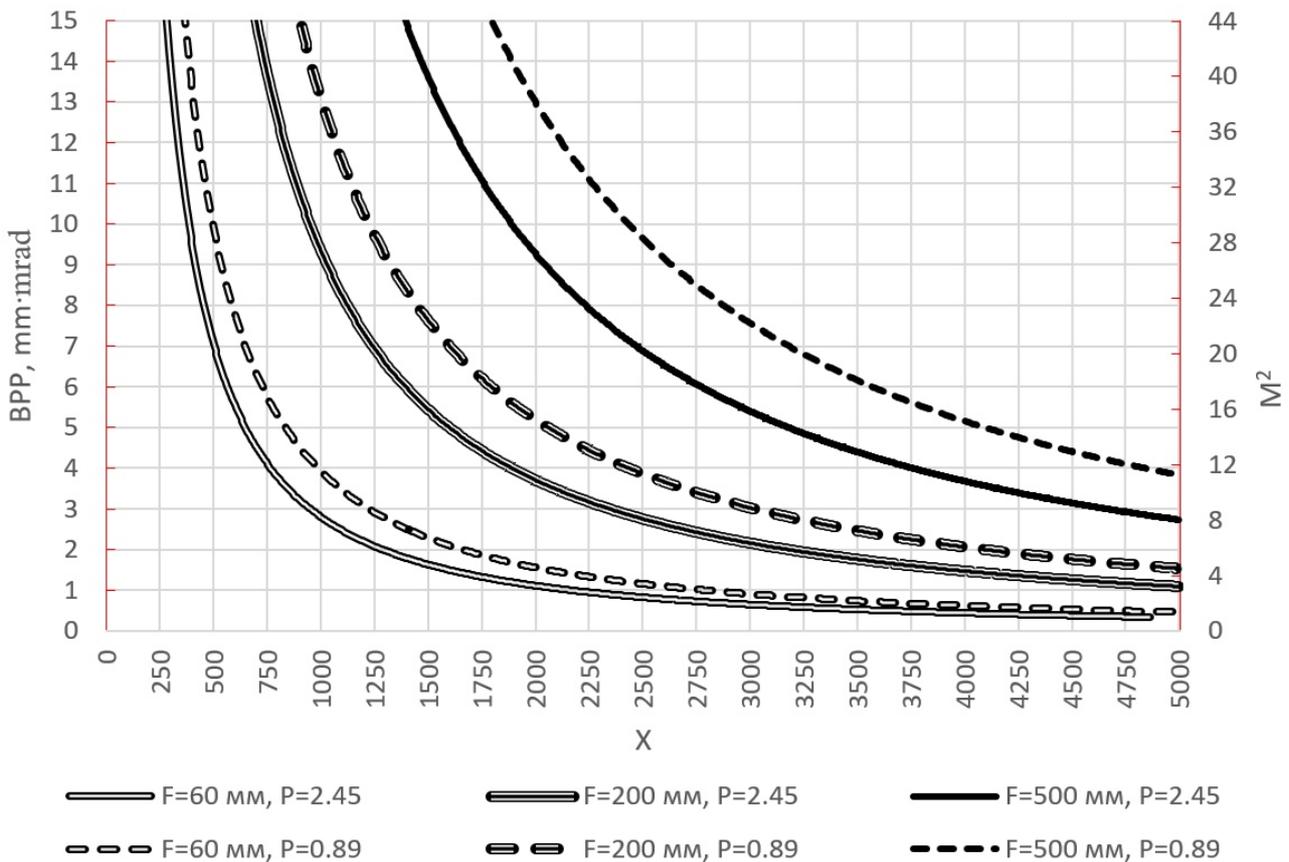


Рис. 2. Номограмма для определения фокусного расстояния оптического тракта

Данная номограмма построена для значений абберационного параметра $P = 2,45$ и $0,89$. Область значений параметра X выбрана таким образом, чтобы перекрыть все комбинации F_k [9] и d_v [10]. Область значений параметров

BPP и M^2 выбрана в соответствии с работой [10]. Зная параметры X и BPP или M^2 , легко определить при каком фокусном расстоянии из представленных будет получен минимальный диаметр пятна.

Заключение

Приведенная номограмма позволяет выбрать наиболее подходящее фокусное расстояние объектива, обеспечивающее минимальный диаметр пятна в фокусе, при известных параметрах качества излучения VPP или M^2 , диаметра волокна и фокусного расстояния коллиматора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богданов, А.В. Особенности оценки технологических возможностей промышленных лазеров // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 11. – С. 34-36.
2. Григорьянц А.Г., Фромм В.А. Оптимизация характеристик сфокусированного лазерного луча для сварки. – Троицк: ПРЕПРИНТ НИЦТЛ. 1984. № 5. – С. 55-56.
3. Григорьянц А.Г., Васильцов, В.В. Пространственная структура излучения мощных волноводных лазеров для технологий // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2012. – Спец. Вып. № 5. – С. 3-33.
4. **Spatial structure** of focused beams in high-power fiber and CO₂ lasers and peculiarities of their application in cutting / V.V. Vasiltsov, M.G. Galushkin, V.D. Dubrov and others // *Laser Physics*. – 2016. – Vol. 26, Issue 5. – С. 1-7.
5. **Богданов, А.В., Соколов, В.И., Шмелев, С.А.** Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий // *Научно-технические технологии в машиностроении*. 2017. – № 10(76). – С. 32-38.
6. **Ширанков, А.Ф., Носов, П.А., Пахомов, И.И. и др.** Разработка лазерно-оптических систем технологических установок на основе теории лазерной оптики // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2013. – № 9. – С. 3-22.
7. **Investigation** of the spatial structure of a high-power fiber laser beam / Nosov P.A., Shirankov A.F., Grigoryants A.G., Tret'yakov R.S. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 584. – Art.no 012006.
8. **Focusing Units**. URL: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/focusing-units> (дата обращения: 20.05.2018).
9. **Collimating units**. URL:

<http://www.optoskand.se/products/external-optics/collimating-units/>

10. Lasers. URL:

<https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers>

REFERENCES

1. Bogdanov, A.V. Peculiarities in assessment of industrial laser technological potentialities // *Engineering Technique*. – 2011. – No.11. – pp. 34-36.
2. Grigoriants, A.G., Fromm, V.A. *Optimization of Characteristics of Focused Laser Beam for Welding*. – Troitsk: PREPRINT RCEL. 1984. No.5 – pp. 55-56.
3. Grigoriants, A.G., Vasiltsov, V.V. Spatial structure of high-capacity waveguide lasers for technologies // *Bulletin of Bauman STU of Moscow*. – 2012. – Special Edition No.5. – pp. 3-33.
4. Spatial structure of focused beams in high-power fiber and CO₂ lasers and peculiarities of their application in cutting / V.V. Vasiltsov, M.G. Galushkin, V.D. Dubrov et al. // *Laser Physics*. – 2016. – Vol. 26, Issue 5. – pp. 1-7.
5. Bogdanov, A.V., Sokolov, V.I., Shmelyov, S.A. Choice of optimum patterns of optical structures for problems of steel parts laser thermal processing // *Science Intensive technologies in Mechanical Engineering*. 2017. – No.10 (76). – pp. 32-38.
6. Shirankov, A.F., Nosov, P.A., Pakhomov, I.I. et al. Laser-optical system development for process units based on laser optics theory // *Engineering Journal: Science and Innovations*. – 2013. – No.9. – pp. 3-22.
7. Investigation of the spatial structure of a high-power fiber laser beam / Nosov P.A., Shirankov A.F., Grigoriants A.G., Tret'yakov R.S. // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2015. – Vol. 584. – Art.no 012006.
8. **Focusing Units**. URL: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/focusing-units> (дата обращения: 20.05.2018).
9. **Collimating units**. URL: <http://www.optoskand.se/products/external-optics/collimating-units/>.
10. Lasers. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru/products/lasers>.

Рецензент д.т.н. Н.А. Лябин

