

УДК 621.375.826

АДАПТАЦИЯ МЕТОДИК ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОКУСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Попов Кирилл Леонидович, Куликов Иван Валерьевич, Баландина Любовь Николаевна

Студенты 3 курса

Кафедра МТ-12

Московский Государственный Технический Университет имени Н. Э. Баумана

Научные руководители: Ю. В. Голубенко⁽¹⁾, А. В. Богданов⁽¹⁾, Д. М. Мельников⁽²⁾.

Кандидат технических наук, доцент кафедры МТ-12⁽¹⁾, аспирант 1 года⁽²⁾.

В настоящее время достаточно важной проблемой при конструировании лазерных систем является корректный подбор и других параметров лазерных систем. Здесь надо заметить, что выбор таких параметров может быть очень трудоёмкой задачей, так как для каждого типа процессов лазерной обработки необходимы определённые характеристики фокусировки луча. Речь идёт о том, для различных процессов требуется уникальная комбинация диаметра пятна в фокусе, длины перетяжки и фокусного расстояния. Факторы, которые, в конечном счёте, определяют эти параметры, так же определяют характеристики структурных составляющих лазерного комплекса.

В своей работе мы выбрали два принципиальных типа лазерных систем – волоконных лазер (мы рассмотрели этот тип на основе установки ЛС – 3.5, вследствие малой изученности проблемы обобщать полученные нами данные для всего спектра волоконных лазерных систем не представляется возможным) и классическую схему твердотельного лазера на примере активного элемента из алюмоиттриевого граната с неодимом.

Волоконные комплексы.

Волоконная оптика это одно из наиболее быстро развивающихся направлений современной лазерной физики. Успехи этого направления связаны с проведением широких комплексных фундаментальных исследований, которые обеспечили не только создание волоконных световодов с предельно низкими потерями, но и уникальных источников когерентного излучения в необходимом спектральном диапазоне. Однако требование увеличения скорости передачи и обработки информации ставит на повестку дня необходимость создания оптических каналов передачи информации со спектральным уплотнением. Именно на решение этой

проблемы в значительной мере и направлены усилия ученых. Дальнейший прогресс невозможен без детальных фундаментальных исследований в области разработки новых элементов систем связи: высокоэффективных источников оптического излучения, оптических усилителей и волоконных световодов.

Волоконная оптика в настоящее время получила широкое развитие и находит применение в различных областях науки и производства (связь, радиоэлектроника, энергетика, термоядерный синтез, медицина, космос, машиностроение, летающие объекты, вычислительные комплексы и т. д.).

Методика расчёта фокусирующих систем волоконных лазеров отличается от традиционных методик расчётов твердотельных лазеров, что связано с существенными отличиями в принципах работы и строением оптического тракта. Поставлена цель: разработать методику расчёта фокусирующей системы волоконного лазера, учитывающую данные особенности.

Оптический тракт волоконного лазера отличается от принципиальной схемы твердотельных лазеров. Его принципиальная схема представлена на рисунке 1.

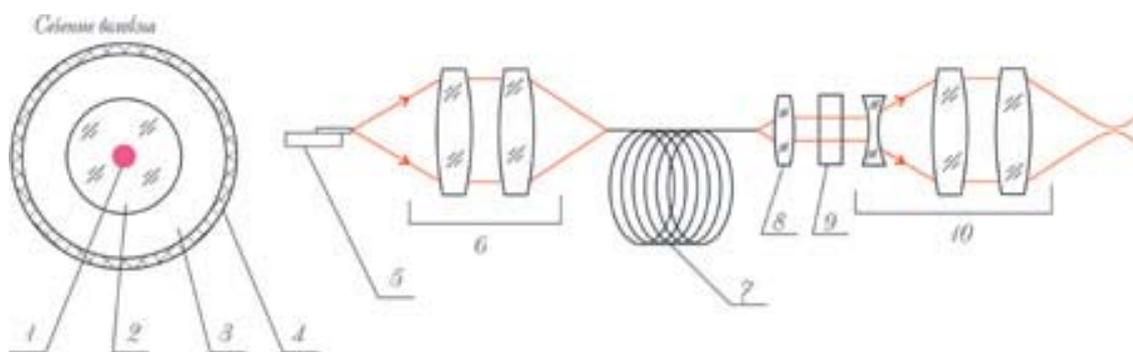


Рис. 1 Принципиальная схема волоконного лазера (1 — сердцевина, легированная металлом, диаметр 6–8 мкм; 2 — кварцевое волокно, диаметр 400–600 мкм; 3 — полимерная оболочка; 4 — внешнее защитное покрытие; 5 — лазерные диоды оптической накачки; 6 — оптическая система накачки; 7 — волокно (до 40 м); 8 — коллиматор; 9 — модулятор света; 10 — фокусирующая оптическая система)

Как видно из рисунка волоконный лазер представляет из себя транспортировочное волокно, коллиматор и фокусирующую систему. Так же виден состав непосредственного волокна. Более подробное изображение волокна представлено на рис. 2.

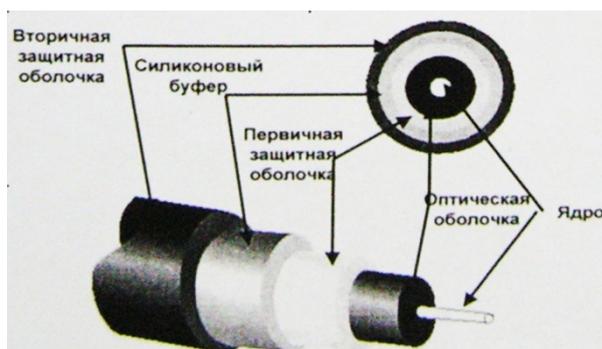


Рис. 2 Структура волокна лазера

В настоящее время на рынке оптических систем представлено большое количество разнообразных видов фокусирующей оптики, коллиматоров и других оптических компонентов. Все они имеют различные характеристики и параметры. Поэтому встает вопрос оптимизации подбора каждого элемента исходя из характеристик лазера и требуемых параметров процесса. Поэтому было принято решение исследовать излучение волоконного лазера и выявить общую зависимость для более удобного подбора оборудования. Для этого был проведен расчёт фокусирующей системы, в ходе которого была выявлена зависимость диаметра пучка лазерного излучения в фокусе от расходимости и мощности излучения выходящего из коллиматора. Данная зависимость, а так же значение одной из основных характеристик транспортировочного волокна – числовой апертуры, позволили провести подбор оптимального коллиматора для требуемых характеристик пучка.

Одной из важнейших зависимостей, определяющих конечные параметры пучка, является зависимость распределения энергии по сечению пучка от мощности излучения. Нами были проведены исследования по изучению данной зависимости (стоит отметить, что для испытываемой модели лазера излучение являлось изначально многомодовым). В экспериментах использовался волоконный лазер компании ИРЭ «Полюс» ЛС-3,5. Данное исследование проводилось методом двух сечений, для излучения, выходящего из коллиматора. Распределение мощности по сечению пучка контролировалось для различных модулей накачки лазера и их комбинаций с варьирования уровня мощности излучения.

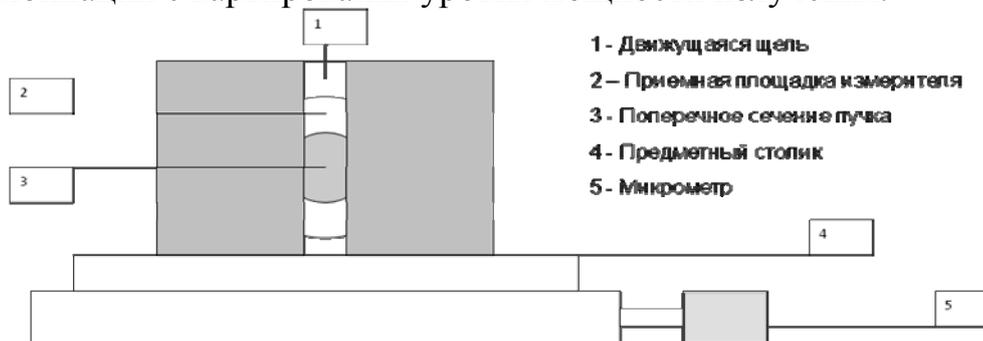


Рис. 3 Схема эксперимента

По итогам экспериментов, при использовании методов статистического анализа, было достигнуто понимание того, как распределяется энергия в пучке мощного волоконного лазера.

Для обработки экспериментально-полученных значений необходимо знать, что радиально-симметричный пучок лазерного излучения описывается местоположением перетяжки пучка Z_0 , диаметром пучка в перетяжке $V\sigma_0$, углом расходимости пучка « $V\sigma$ » в дальней зоне. Перетяжкой пучка измеряется его сечение с минимальными полезными размерами. Зная эти параметры можно для углов расходимости менее 0,8 рад записать уравнение распространения пучка вдоль его оси Z : $d_\sigma^2(Z) = d_{\sigma_0}^2 + (Z - Z_0)^2 V_\sigma^2$. Где Z_0 - положение перетяжки от начала оси Z (Обычно начало оси Z совпадает с выходом излучения).

Качество пучка в процессе его распространения будем, аналогично [100] характеризовать показателем (коэффициентом) « K » распространения пучка или обратной ему величиной M^2 , являющейся мерой близости произведения параметров измеряемого пучка к аналогичному произведению для идеального гауссова пучка. Поэтому появилось выражение «критерий M^2 ». Для гауссова пучка с одной модой ТЕМ₀₀ значение $M^2=1$.

Величины K (M^2), $d\sigma_0$ и V_σ связывает выражение:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{4\lambda_0}{\pi} \cdot \frac{1}{n \cdot d\sigma_0 \cdot V_\sigma} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{d\sigma_0 \cdot V_\sigma}, \text{ где: } \lambda_0 - \text{длина волны в вакууме; } \lambda -$$

длина волны в среде с « n ». Произведение $nd\sigma_0V_\sigma = \frac{4\lambda_0}{K\pi} = \frac{M^2 \cdot 4\lambda_0}{\pi}$ является инвариантом распространения пучка лазерного излучения в безабберационной среде в отсутствие ограничивающих его диафрагм.

При измерении пространственно-электрических характеристик лазерного излучения решаются, как правило, четыре задачи определения: ширины и диаметра пучка, угла расходимости пучка, коэффициента распространения « K » или коэффициента превышения дифракционного предела $M^2 = \frac{1}{K}$, Координаты расположения перетяжки пучка. Для определения диаметра пучка $d\sigma(Z)$ следует измерить распределение плотности мощности энергии в сечении пучка x' и y' с координатой Z и при этом найти азимутальный угол φ между осью « x » пучка и осью « x' » лабораторной системы координат. Для определения V_σ - угла расходимости пучка в дальней зоне – необходимо использовать безабберационный фокусирующий оптический элемент с фокусным расстоянием f . Измерению подлежит диаметр $d\sigma_f$ пучка в точке оси, расположенной на расстоянии f от задней главной плоскости фокусирующего элемента. Угол расходимости

лазерного пучка рассчитывается по формуле $V_{\sigma} = \frac{d\sigma_f}{f}$. Для определения К или M^2 необходимо найти диаметр перетяжки $d\sigma_0$ и углы расходимости V_{σ} . Для определения координаты «Z» расположения перетяжки пучка необходимо учитывать параметры распространения излучения и использовать аппроксимирующие формулы.

В качестве измерителя мощности излучения использовался измеритель на базе термоголовки Ophir 5000 W

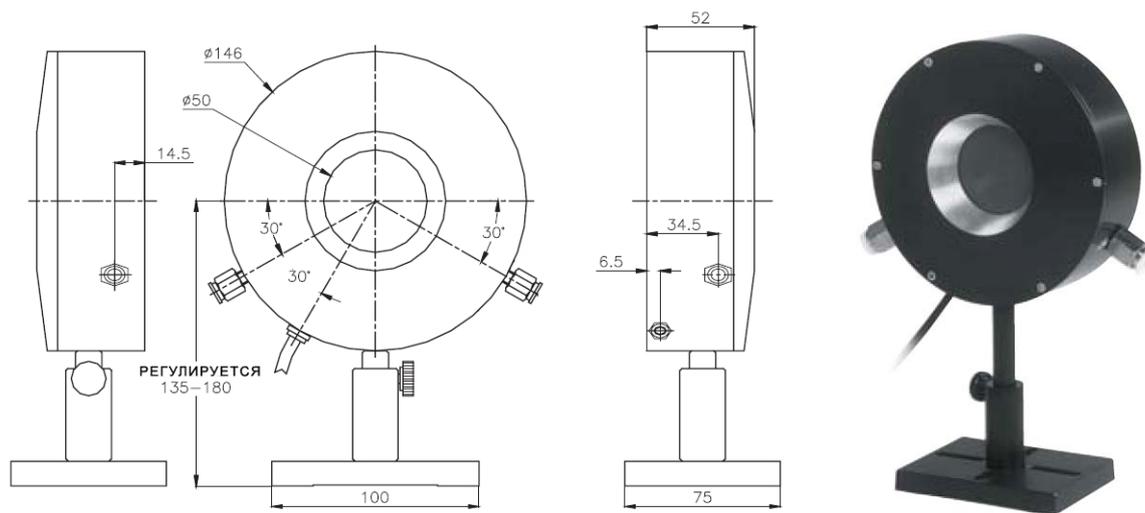


Рис. 4 Измеритель мощности

По результатам экспериментов и статистического анализа, было построено семейство графических зависимостей, пример которых представлен на рис. 5.

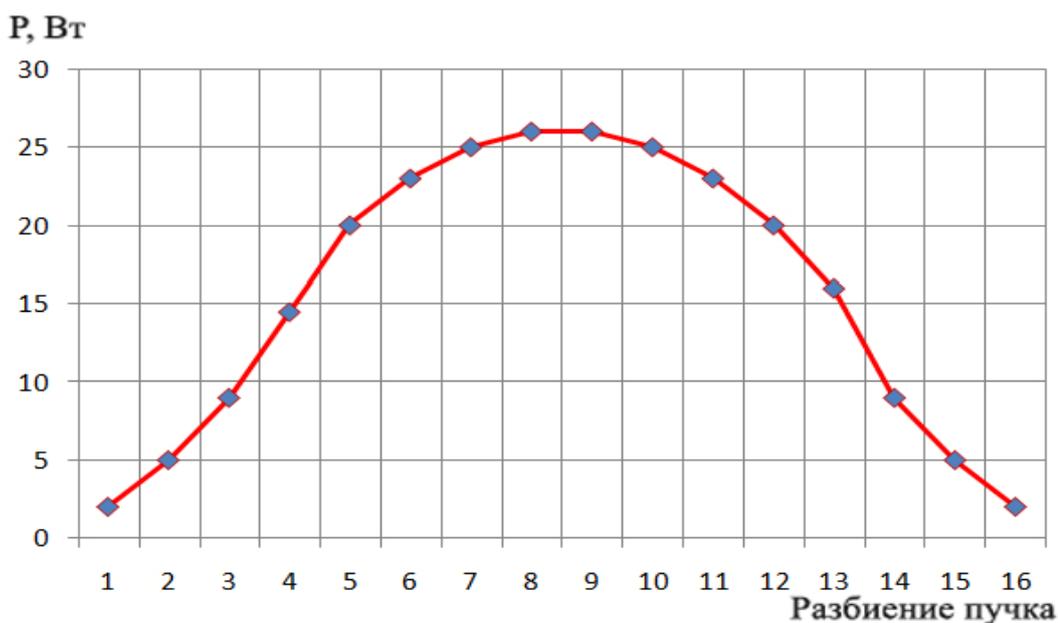


Рис. 5 Пример распределения мощности излучения по сечению пучка

При анализе итогов вышеизложенных мероприятий стало ясно, что распределение мощности излучения по сечению пучка практически не

зависит от мощности излучения, что позволяет не учитывать её при подборе оптической системы. Так как такая зависимость ранее трудно поддавалась численному представлению, исключение её из расчёта при подборе оптической системы может позволить значительно приблизить расчётные данные к реальным [2,3].

К основным параметрам волоконного световода относятся диаметр сердцевины $2a$, диаметр оболочки $2b$, числовая апертура NA , оптические потери α , длина L . В зависимости от типа волоконного световода диаметр сердцевины может составлять от 1 до 100 мкм, диаметр оболочки – от 100 до 1000 мкм. Для световодов, используемых в оптических линиях связи, диаметр сердцевины около 10 мкм, оболочки – 125 мкм.

Понятие числовой апертуры связано с максимальным углом φ_c между лучом, введённым в световод, и осью световода, когда излучение «захватывается» волноводной структурой ($\varphi_c = 90^\circ - \theta_c$): $NA = \sin \varphi_c \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$. Лучи, введённые в световод под углами больше φ_c , не испытывают полного внутреннего отражения, а преломляются и вытекают. На выходе волоконного световода излучение также сосредоточено в конусе с половинным углом φ_c .

Оптические потери, или поглощение, обычно выражаются в см^{-1} . Однако в стандартных волоконных световодах потери малы и обычно выражаются в дБ/км. При этом справедливо соотношение: $1 \text{ см}^{-1} = 4,3 \cdot 10^5$ дБ/км. Длина L отдельных отрезков световода может составлять несколько десятков километров. Волноводные свойства волоконного световода зависят не только от его параметров, но и от длины волны λ распространяющегося излучения. Чтобы учесть этот фактор, вводится нормированная частота $V = 2\pi a \cdot \frac{NA}{\lambda}$. Значение нормированной частоты, в частности, определяет модовый состав излучения в световоде. С формальной точки зрения, мода – это устойчивое состояние электромагнитного поля внутри световода, одно из решений уравнений Максвелла для заданной структуры. Условно моду световода можно определить и как траекторию распространения света. Если $V < 2,4$, то в световоде распространяется лишь одна мода. Световоды, в которых реализуется такой режим в ближней ИК-области, определяются как *одномодовые*. При $V > 2,4$ появляются моды более высоких порядков. Число мод при большом значении нормированной частоты порядка $V^2/2$. Понятие «одномодовости» носит несколько условный характер, т.к. при уменьшении длины волны излучения одномодовый световод становится многомодовым.[1].

Классические твердотельные комплексы

Расчёт твердотельных лазеров, проведённый нами, позволяет определить зависимости искомых параметров от выходной мощности, расходимость, лазерного излучения, диаметр луча до фокусировки. Разработанная схема составлена таким образом, чтобы при окончательно

подборе характеристик структуры лазерного комплекса, ею можно было пользоваться в качестве направления выбора правильного пути исследования.

Сущность расчёта, как и в случае волоконных лазеров, состоит в том, что мы отдельно просчитывали ход каждого луча с учётом его преломлений от каждой оптической поверхности. В сущности, отличие твердотельных лазеров от волоконных, с точки зрения нашей работы, заключается в дополнительном влиянии на искомые параметры так называемой «тепловой линзы», которая возникает из-за нагрева кристалла и зависит от мощности накачки [4].

Некоторые из полученных графических зависимостей представлены на рисунках 6-10.

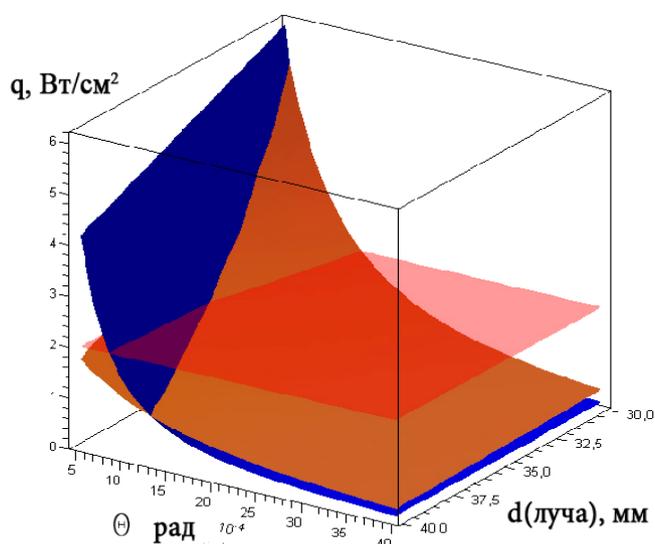


Рис. 6 Пример получаемых расчётных зависимостей: зависимость плотности мощности излучения от расходимости излучения и диаметра луча до фокусирующей системы для различных фокусных расстояний.

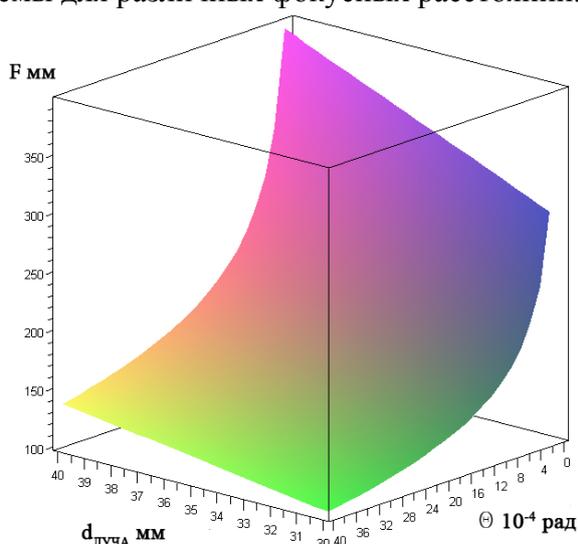


Рис. 7 Зависимость фокусного расстояния от расходимости и диаметра луча

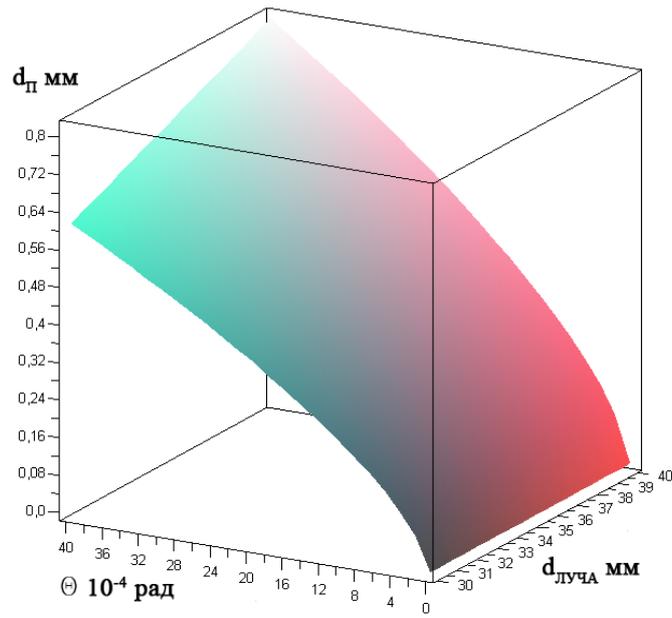


Рис.8 Зависимость диаметра пучка от расходимости и диаметра луча

Длина перетяжки, мм

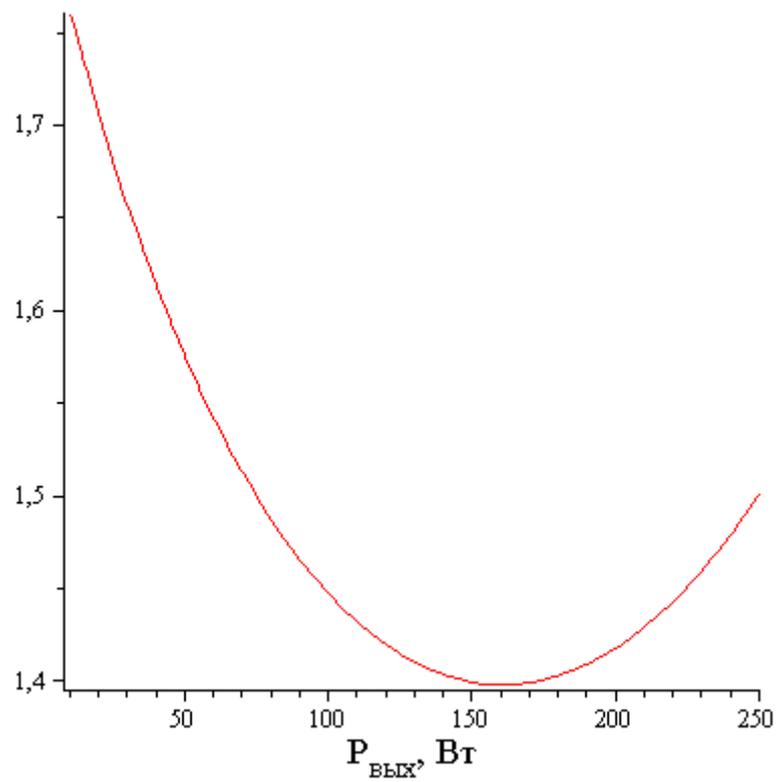


Рис. 9. Зависимость длины перетяжки от требуемой выходной мощности лазера.

Литература

1. *А. Ф. Котюк* «Основы оптической радиометрии» М. Физмалит, 2003, 544 стр.
2. «Наблюдение пассивной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере», ЖТФ 2001 год, том 21, вып. 10.
3. *А. Н. Бочаров, А. В. Мурыгин* «Определение ширины плотности распределения энергии электронного пучка по его сечению при электронно-лучевой сварке», Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева, 2005.
4. *Г.М. Зверев Ю.Д Голяев* «Лазеры на алюмоиттриавом гранате с неодимом», -М., Радио и связь, 1985.