

УДК 621.378.9

## Расчетно-экспериментальная оптимизация пространственных характеристик лазерного излучения установки "Луч"

*Н. В. Воронина, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин, А. И. Зарецкий, Л. В. Львов,  
А. Н. Маначинский, О. А. Рыжова, А. Б. Смирнов, С. А. Сухарев,  
Н. А. Филатова, И. Е. Чернов*

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., Россия

*И. В. Епатко, Р. В. Серов*  
Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*Проведено расчетное исследование влияния различных параметров оптической системы (аббераций, неоднородностей материала, погрешностей изготовления оптических элементов, размера и положения диафрагм пространственных фильтров) на пространственные характеристики лазерного излучения установки "Луч". Осуществлена экспериментальная компенсация искажений волнового фронта излучения.*

В РФЯЦ ВНИИЭФ проводится работа по созданию мощной лазерной установки на неодимовом фосфатном стекле "Искра-6". Установка должна представлять собой 128-канальный лазер, предназначенный для проведения физических исследований в области управляемого лазерного термоядерного синтеза с энергией 300 кДж на длине волны 351 нм.

Создание такой уникальной установки представляет собой достаточно наукоемкую и дорогостоящую научно-техническую задачу, требующую экспериментальной проверки на более простых моделях основных научных идей и технических решений, заложенных в разработку конструкции "Искры-6". Такой моделью является установка "Луч" [1] с энергией излучения 12—16 кДж в четырех пучках размером 200х200 мм на длине волны 1053 нм при длительности лазерного импульса 3—5 нс.

Факторами, приводящими к ухудшению однородности пучка и увеличению расходимости излучения, являются погрешности изготовления оптических элементов, абберации оптической системы, турбулентность атмосферы в канале, дифракция излучения на различных диафрагмах, нелинейные процессы в оптической среде лазера.

Назначение оптической системы установки "Луч" — обеспечение транспортировки светового

пучка нужного качества и размеров от задающего генератора до мишени. Оптическая система определяет пространственные характеристики излучения (распределения в дальней и ближней зонах, форму волнового фронта) на выходе силового тракта, которые являются решающими для обеспечения эффективности преобразования излучения в высшие гармоники и фокусировки его на мишень.

Оптическая система (ОС) установки "Луч" (рис. 1) состоит из системы формирования опорного излучения (СФОИ) и силового тракта установки. Излучение четыре раза проходит через два усилителя, кюветный пространственный фильтр (КПФ) и транспортный пространственный фильтр (ТПФ), следовательно, количество элементов системы возрастает, увеличивается и их вклад в искажение излучения.

появлению астигматизма, заметно ухудшающего распределение излучения на выходе.

Цель данной работы — расчетное исследование влияния различных параметров оптической системы (аббераций, неоднородностей материала, погрешностей изготовления оптических элементов, размера и положения диафрагм пространственных фильтров) на пространственные характеристики лазерного излучения установки "Луч" с последующей экспериментальной компенсацией искажений.

**Численное моделирование излучения, формируемого оптической системой**

Расчет пространственных характеристик лазерного излучения проводился с помощью специализированной программы FRESNEL [2], раз-

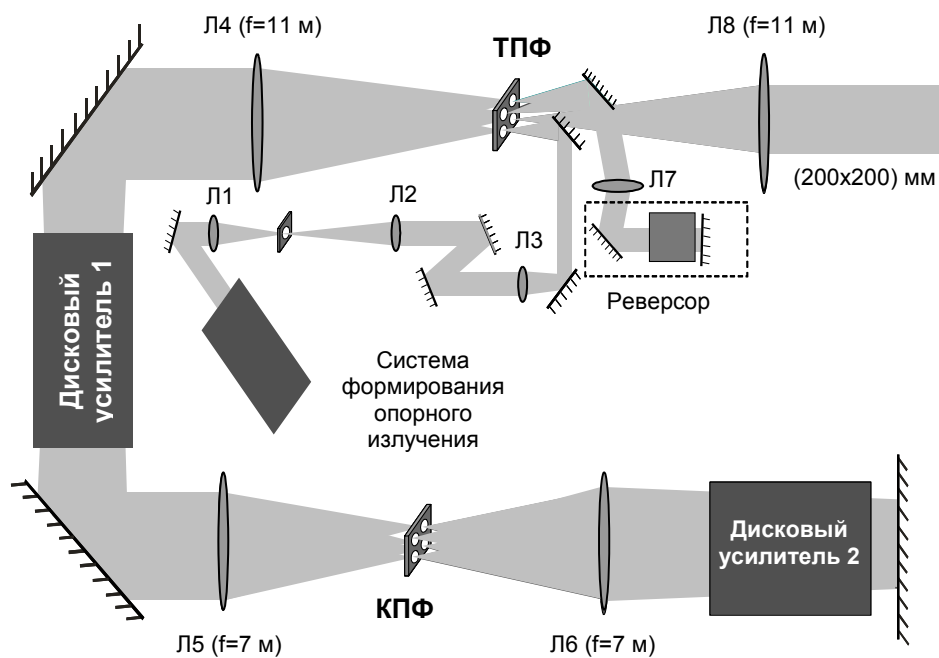


Рис. 1. Многопроходная оптическая система установки "Луч"

Эксперименты, проведенные на установке "Луч", показали, что по мере прохождения излучения по силовому оптическому тракту заметно ухудшается распределение излучения в ближней и дальней зонах. Одна из причин этого связана с конечным качеством изготовления поверхностей и материала оптических элементов (неоднородность показателя преломления, свили, пузыри, включения). Основную роль в ухудшении параметров излучения играют дисковые активные элементы (ДАЭ). Их количество на четырех проходах составляет 72, оптический путь в каждом — около 5 см, следовательно, общая их толщина достигает 360 см, поэтому большое влияние оказывают неоднородности материала. Линзы вносят в оптическую систему установки "Луч" сферическую абберацию, а общие ошибки изготовления ДАЭ, стоящих под углом Брюстера, приводят к работанной для расчета наиболее важных характеристик лазерного пучка, распространяющегося по оптической системе. Отличие этой программы от других по-

добных заключается в том, что она учитывает дифракцию на диафрагмах и апертурах элементов, позволяет учитывать неоднородности оптических элементов и различные волновые абберации, запыленность поверхности, усиление излучения, нелинейные процессы и другие эффекты. Она дает возможность моделировать реальное распространение излучения через оптическую систему.

В ходе выполнения данной работы в программе FRESNEL была смоделирована расчетная схема силового тракта установки "Луч". Расчет начинался с плоскости адаптивного зеркала (АЗ). Входное излучение задавалось как пучок с плоской вершиной с постоянной временной зависимостью интенсивности длительностью  $\tau = 3 \text{ нс}$ , с энергией  $E = 1 \text{ Дж}$ , длиной волны  $\lambda = 1053 \text{ нм}$ , размером  $3,5 \times 3,5 \text{ см}$  и смягчением  $\delta = 0,072 \text{ см}$ . Смягчение пучка вводится для избежания ди-

фракции на его краях. Дальняя зона излучения регистрируется в фокальной плоскости 15-метровой линзы.

Проведен расчет идеального варианта схемы силового тракта для того, чтобы с его результатами сравнивать результаты последующих расчетов в целях изучения влияния различных факторов на пространственные характеристики лазерного излучения. В схеме не учитывались aberrации оптической системы, неоднородности оптических элементов.

Размер пучка на выходе усилительного тракта равен  $20 \times 20$  см, а в плоскости минимального пятна дальней зоны  $0,013$  см — расходимость  $8,7 \cdot 10^{-6}$  рад. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка приведено на рис. 2.

В четырехпроходной схеме из-за наклонного хода лучей максимальное поперечное смещение пучка на линзах достигает 18 мм по вертикали и горизонтали,

вследствие чего происходит увеличение aberrаций. Относительно опорной плоскости разница максимальных отклонений волнового фронта  $PV = 3,5 \lambda$ , среднеквадратичное отклонение  $RMS = 0,61 \lambda$ . Для плоскости наилучшей установки  $PV = 1,18 \lambda$ ,  $RMS = 0,16 \lambda$ . Размер пятна  $0,028$  см (по уровню энергии 76 %) соответствует расходимости  $2 \cdot 10^{-5}$  рад. Следовательно, сферическая aberrация линз разработанной схемы не приводит к заметному увеличению расходимости излучения. Показана возможность ее компенсации при юстировке оптической системы сдвигом линз.

Для исключения попадания бликовых отражений от линз в апертуру усилителей линзы повернуты на некоторые углы. Кома устранена выбором оптимальной формы линз. Компенсация астигматизма осуществляется их поворотом во

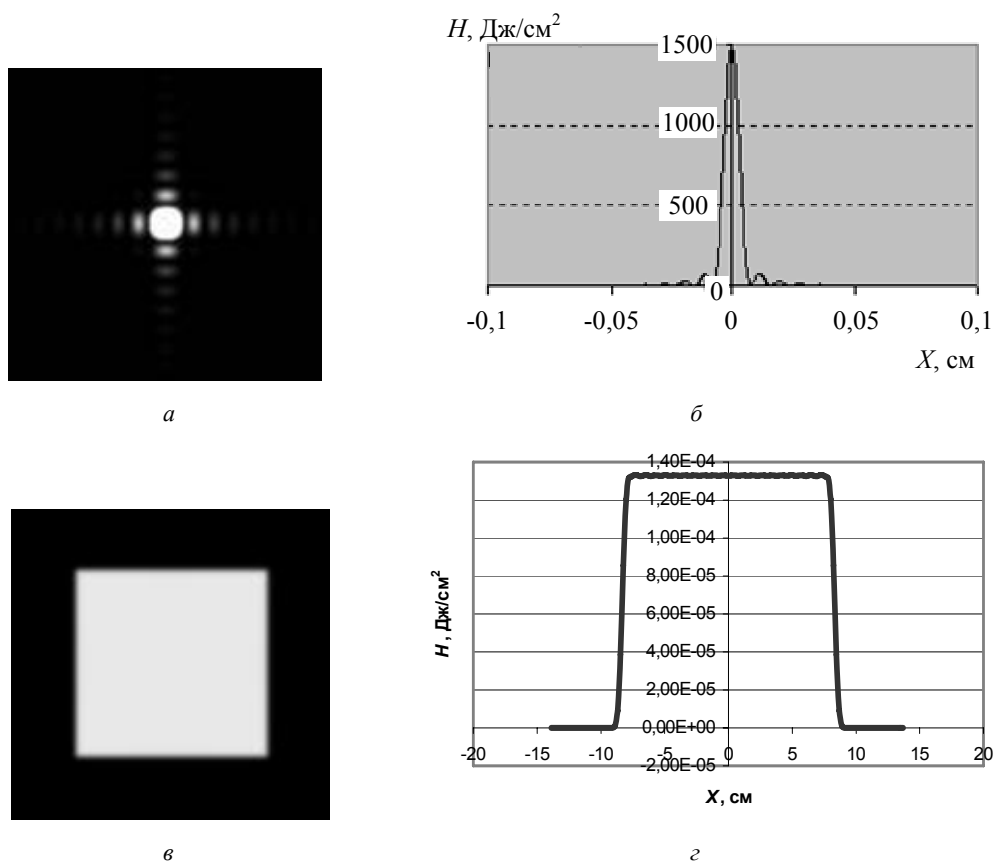


Рис. 2. Расчетные пространственные характеристики пучка при идеальной схеме:  
*a* — форма пучка в дальней зоне; *b* — распределение плотности энергии в дальней зоне; *в* — форма пучка в ближней зоне;  
*г* — распределение плотности энергии в ближней зоне

#### Влияние aberrаций на пространственные характеристики лазерного излучения

Проведено исследование влияния астигматизма и сферической aberrации оптической системы на пространственные характеристики лазерного излучения в взаимно перпендикулярных плоскостях. Однако из-за общих ошибок изготовления оптических элементов, стоящих под большими углами, в схеме имеется некомпенсированный астигматизм.

Для моделирования наблюдаемых в проведенных экспериментах искажений в расчетную схему вводился астигматизм размером  $1 \lambda$  на каждый усилитель, так что его суммарный размер на выходе схемы составляет  $8 \lambda$ . Полученные при этом распределения излучения приведены на рис. 3. При данных размерах aberrаций их влияние на размер пучка в ближней зоне незначительное (в пределах 1 мм), а размер в дальней зоне увеличился в пять раз. Для диафрагм с размерами  $0,3$  см в ТПФ и  $0,2$  см — в КПФ возникает "модуляция" излучения около 8 %.

При увеличении всех диафрагм до 0,5 см модуляция становится меньше 0,5 %, но при этом ухудшается фильтрация излучения от высоких пространственных частот, приводящих к самофокусировке.

Смоделирована ситуация по компенсации астигматизма усилителей вводом рассчитанного астигматизма на линзы КПФ. В результате в ближней зоне был получен размер, равный 19,4×19,4 см, а в дальней зоне — размер 0,04×0,04 см. Распределение излучения в поперечном сечении пучка в ближней и дальней зонах приведено на рис. 4. Искажения в ближней зоне вызваны возникшей при повороте линз дефокусировкой и тем, что компенсация осуществляется только поворотом линз КПФ (имеется астигматизм в ТПФ). Определены углы поворота линз, позволяющие скомпенсировать астигматизм и повысить равномерность распределения

излучения установки. Экспериментальная компенсация астигматизма поворотом линз КПФ была осуществлена в первом и втором каналах установки.

Исследовалось также влияние размера и положения диафрагм пространственных фильтров на пространственные характеристики лазерного излучения. В расчет-

ной схеме с деформациями волнового фронта  $5 \lambda$  менялся размер диафрагмы ТПФ в четвертом проходе от 0,5 до 0,1 см.

Показано, что при диаметре диафрагмы, сравнимым с размером пучка, происходит виньетирование пучка, которое приводит к снижению интенсивности в отдельных зонах пучка, а при уменьшении размера диафрагмы до 80 % от размера пучка возникают недопустимые искажения изображения в ближней зоне, появляются участки с нулевой интенсивностью.

Положение диафрагмы (эффект неправильной юстировки) влияет на ее смещение на величины 0,1—1 мм от оптической оси. Показано, что уже при поперечном смещении диафрагмы пространственного фильтра на 3 % от ее диаметра происходит искажение изображения, наблюдается небольшое увеличение размера пучка в ближней зоне, модуляция излучения в ближней зоне возрастает, уменьшается размер пучка в дальней зоне (происходит обрезание пучка).

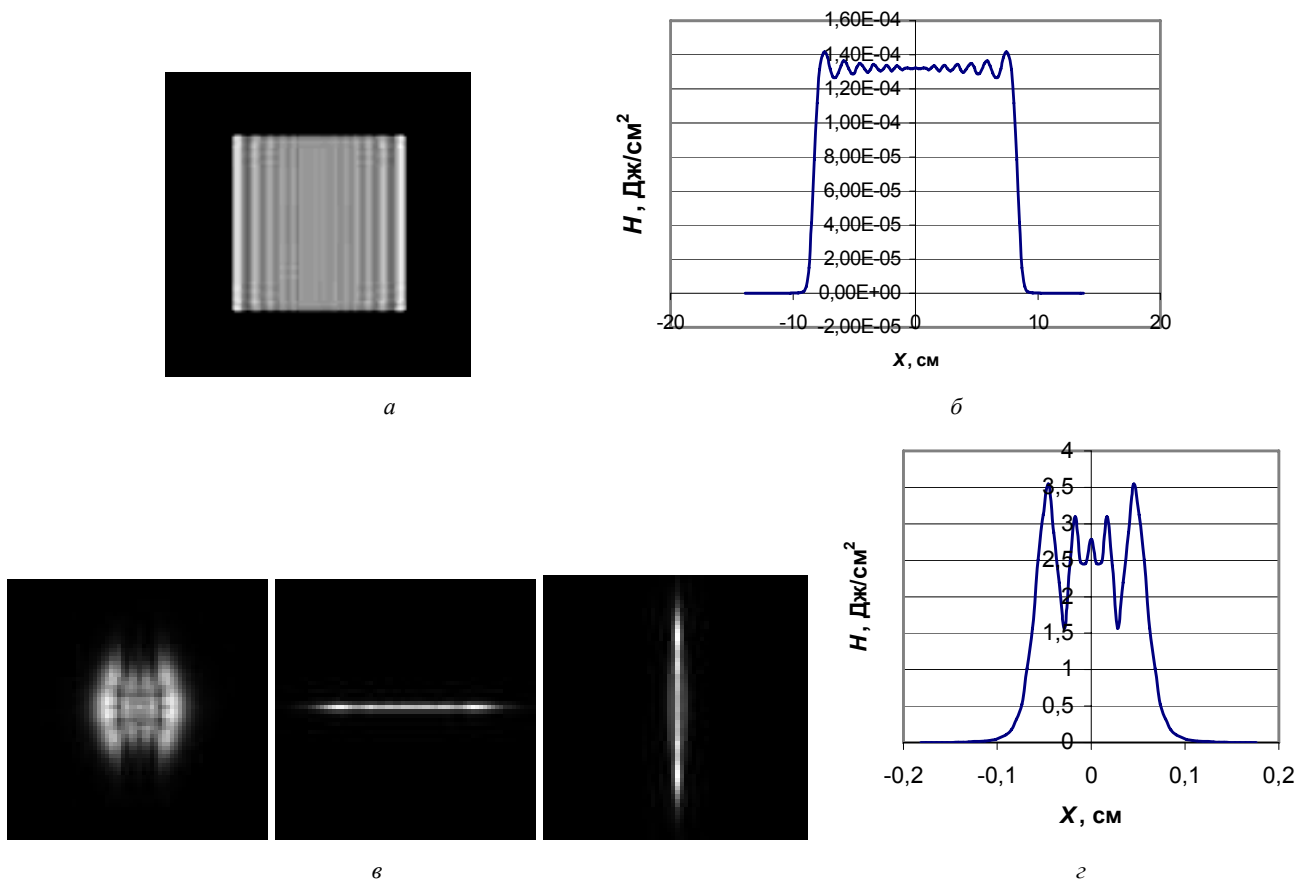


Рис. 3. Расчетные пространственные характеристики излучения в схеме с астигматизмом на двух усилителях: а — форма пучка в ближней зоне; б — распределение плотности энергии в ближней зоне; в — форма пучка в дальней зоне; г — распределение плотности энергии излучения в дальней зоне

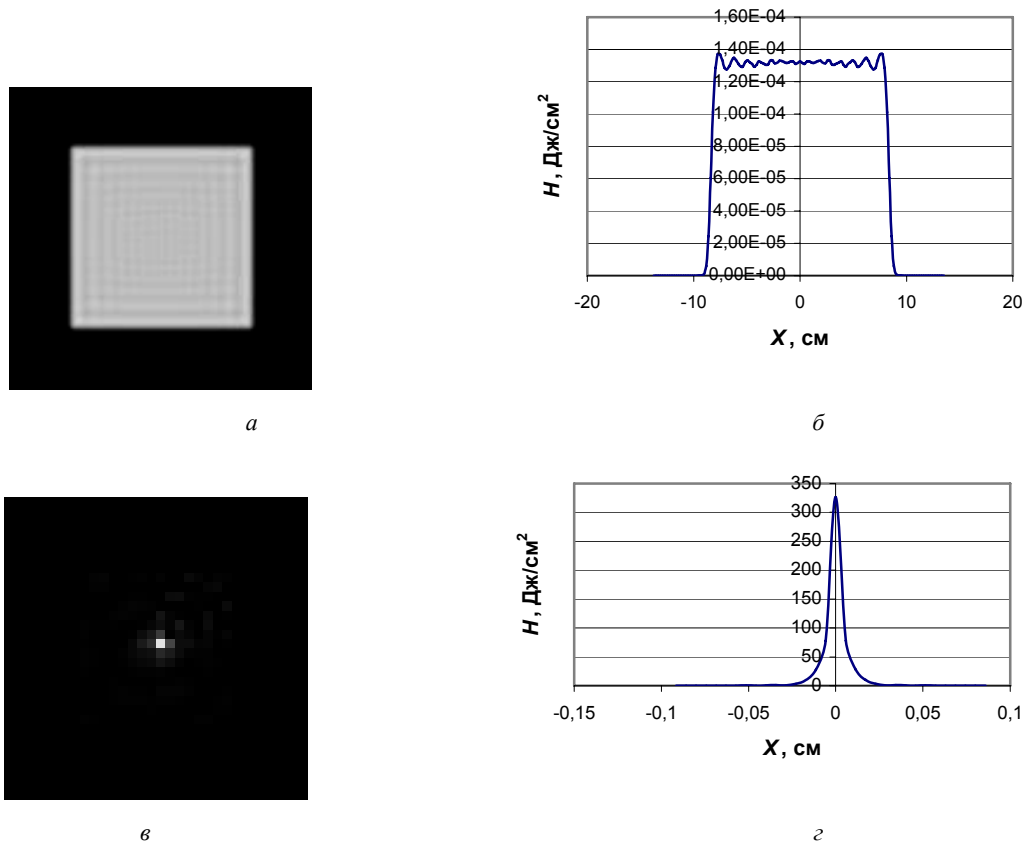


Рис. 4. Структура пучка в схеме при скомпенсированном астигматизме:

*a* — форма пучка в ближней зоне; *b* — распределение плотности энергии в ближней зоне; *c* — форма пучка в дальней зоне; *d* — распределение плотности энергии в дальней зоне

Анализ влияния размера и положения диафрагм ПФ на распределение интенсивности излучения в ближней и дальней зонах позволил дать рекомендации в выборе их оптимальных размеров и определении требований к точности юстировки.

#### Моделирование фазовых искажений дисковых активных элементов по результатам интерферометрического контроля

В программе Fresnel фазовые искажения задаются в виде текстового файла размерами  $128 \times 128$ ,  $256 \times 256$  и т. д. Результаты интерферометрического контроля дисковых активных элементов (ДАЭ) с помощью двухпроходного интерферометра Физо (рис. 5) преобразованы в матрицы размером  $256 \times 256$  элементов с помощью двумерной сплайн-интерполяции так, чтобы сохранились максимальное отклонение волнового фронта PV и его среднеквадратичное отклонение RMS. Аппроксимация с помощью полиномов даже высокой степени приводит к сглаживанию ВФ и, следовательно, к уменьшению расходимости излучения.

Проведено суммирование искажений для двух усилителей и четырех проходов. Полученные деформации волнового фронта при наклонном ходе пучков по усилите-

лям дают значения  $PV = 2,14 \lambda$  и  $RMS = 0,44 \lambda$ . Рассчитанные с таким волновым фронтом пространственные характеристики излучения на выходе тракта без учета других aberrаций приведены на рис. 6, размер ДЗ  $0,06 \times 0,05$  см ( $E = 68\%$ ), при  $E = 80\%$  пятно  $0,07$  см, что соответствует расходимости  $5 \cdot 10^{-5}$  рад. При различных способах аппроксимации фазовых экранов, моделирующих искажения ДАЭ, и расчетных моделях оптической системы значения расходимости отличаются незначительно. Для сглаженных фазовых искажений получается более ровное распределение излучения в ближней зоне. При размере фазовых экранов  $22 \times 22$  см происходит дифракция излучения на их краях. Расходимость излучения существенно не изменяется, но заметно увеличивается "изрезанность" ближней зоны (рис. 7), такое распределение ближе к зарегистрированному на выходе тракта излучению юстировочного лазера.

В схеме со сферической aberrацией на линзах волновые aberrации увеличиваются: PV — до  $3,4 \lambda$  и RMS — до  $0,48 \lambda$ . Распределение интенсивности в плоскости минимального пятна (размер  $0,073 \times 0,073$  см по уровню энергии  $78\%$ , по уровню энергии  $82\%$  — размер пучка  $0,08$  см), т. е. расходимость увеличилась незначительно.

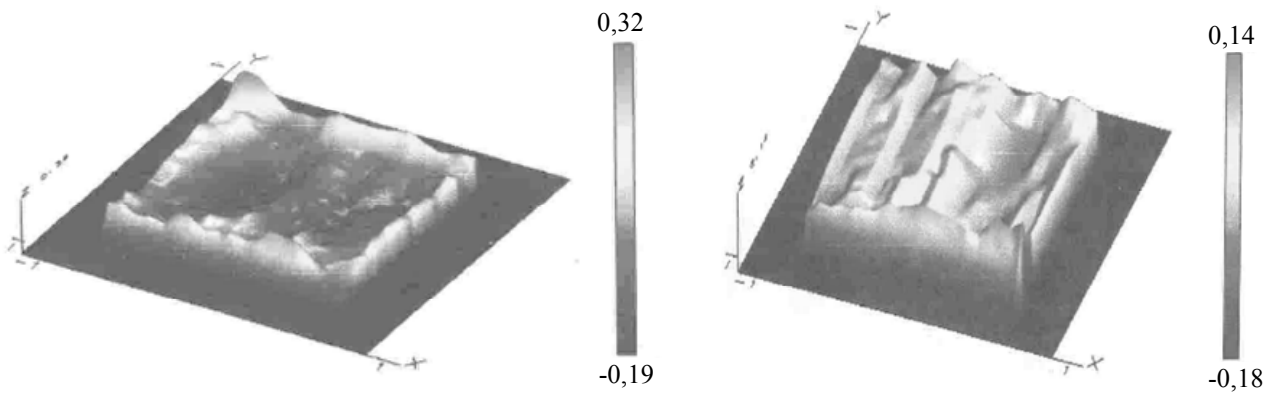


Рис. 5. Волновой фронт дисковых активных элементов по результатам интерферометрического контроля

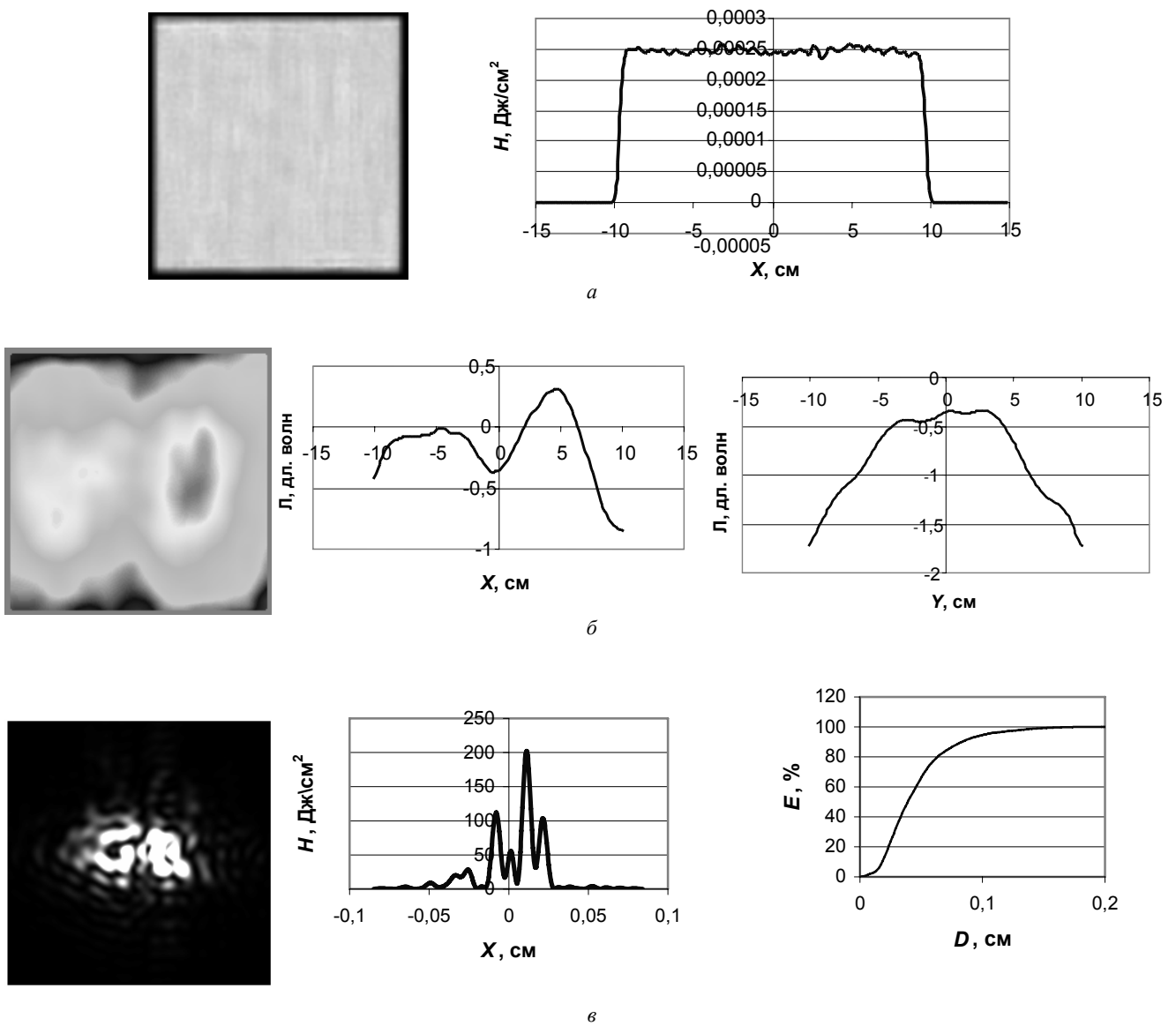


Рис. 6. Расчетные пространственные характеристики лазерного излучения в четырехпроходной схеме без аберраций с дисковыми активными элементами:  
 а — распределение интенсивности излучения в ближней зоне; б — форма волнового фронта;  
 в — распределение интенсивности и энергии излучения в дальней зоне

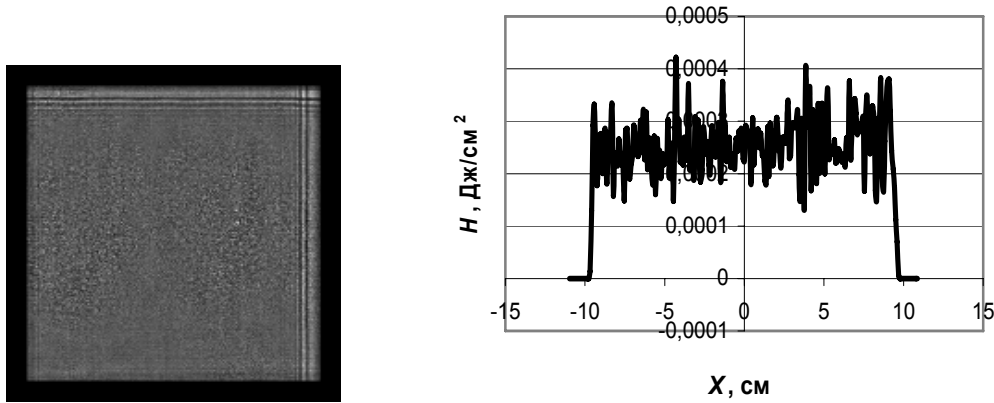


Рис. 7. Расчетное распределение излучения на выходе схемы с ограниченным размером фазовых экранов

В полученных с помощью гартманновского датчика распределениях волнового фронта заметен некомпенсированный астигматизм. Он может возникать на повернутых на  $45^\circ$  зеркалах, линзах, других деформированных элементах. Введение фазовых экранов с астигматизмом позволило смоделировать волновой фронт (рис. 8), похожий на эксперименталь-

но зарегистрированный с  $PV = 4,6\lambda$  и  $RMS = 0,87\lambda$ . Распределение интенсивности в плоскости минимального пятна ДЗ:  $0,14 \times 0,13$  см ( $E = 72\%$ ), при  $E = 80\%$  размер пятна  $0,146$  см, что соответствует расхождению  $1 \cdot 10^{-4}$  рад, близкой к экспериментально зарегистрированной.

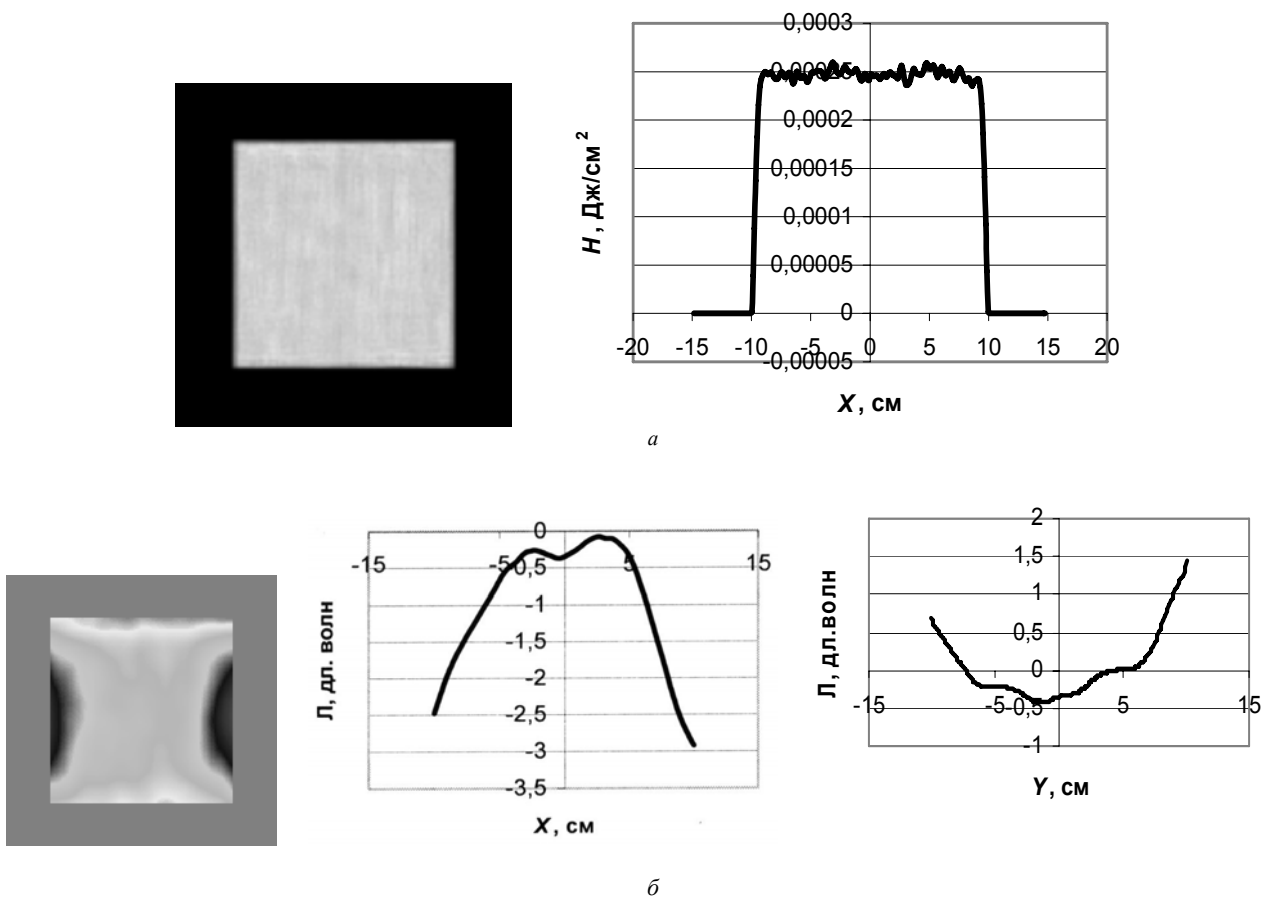
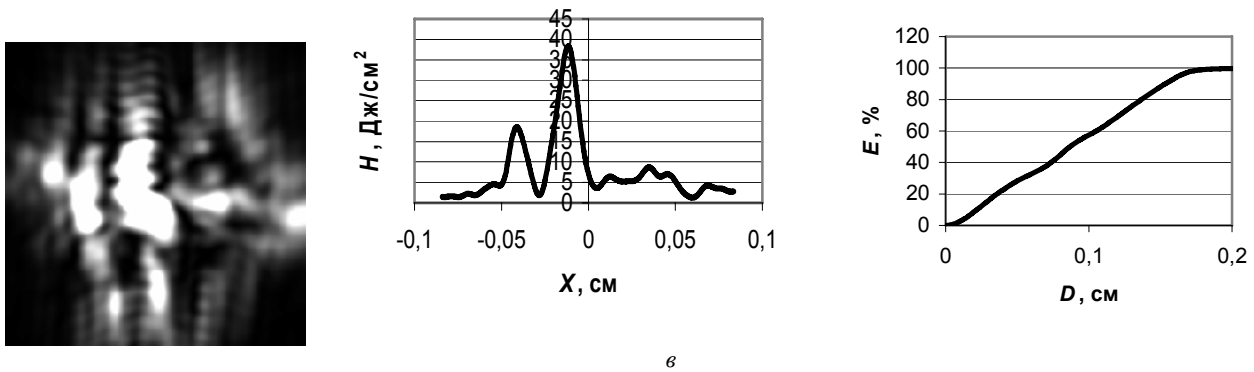


Рис. 8. Расчетные пространственные характеристики лазерного излучения в схеме со сферической aberrацией, астигматизмом и дисковыми активными элементами:

*a* — распределение интенсивности излучения в ближней зоне; *б* — форма волнового фронта;



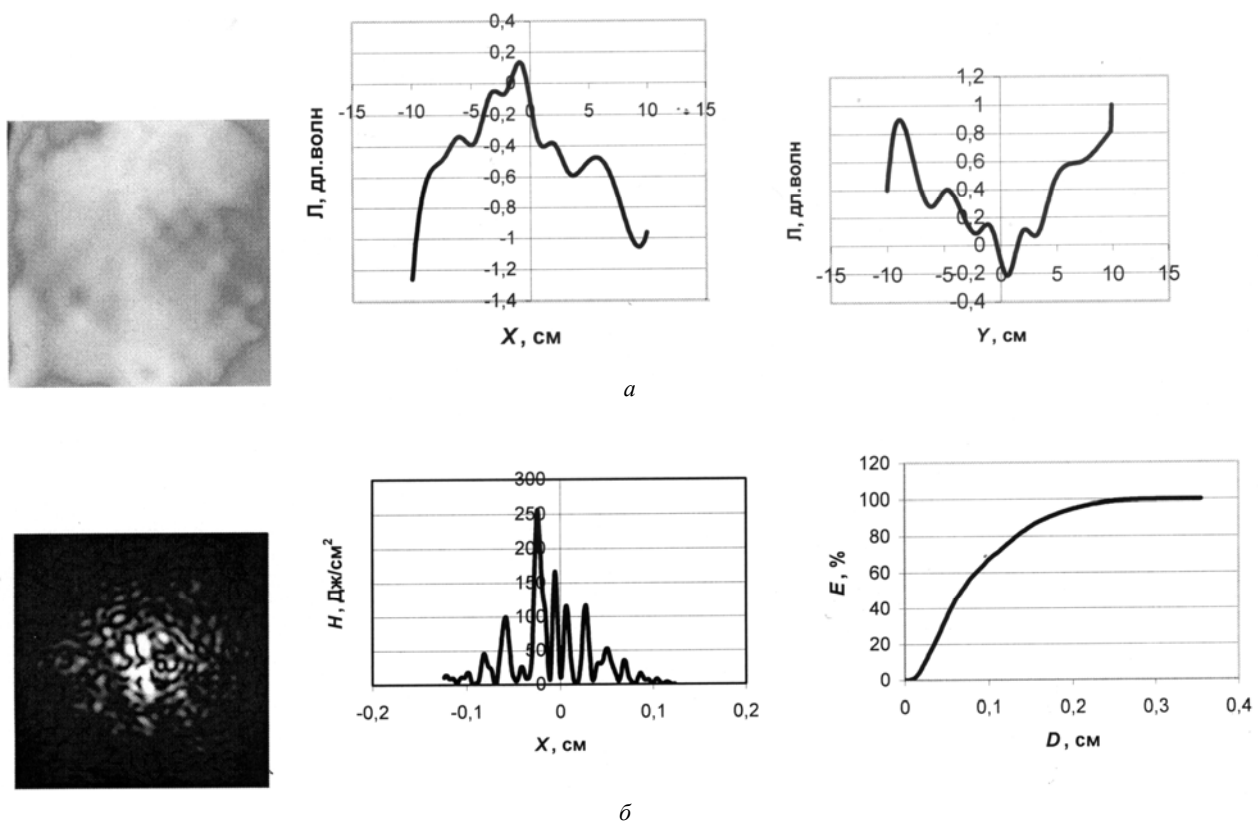
в

Рис. 8. Окончание:

в — распределение интенсивности и энергии излучения в дальней зоне

Результаты измерения волновых фронтов, проведенные с помощью гартманновских датчиков, были преобразованы в матрицы размером  $256 \times 256$  элементов с помощью двухмерной сплайн-интерполяции так, чтобы сохранились максимальное отклонение волнового фронта PV и его среднеквадратичное отклонение RMS. Полученные фазовые экраны помещались перед измерительной линзой с фокусным расстоянием 15 м. Результаты расчетов распределения излучения в дальней зоне приведены на рис. 9 и 10. Расходимость излучения по уровню 80 % энергии составляет  $9,3 \cdot 10^{-5}$  и  $4,7 \cdot 10^{-5}$

$^5$  рад, вся энергия излучения заключена в угле  $2,1 \cdot 10^{-4}$  и  $1,5 \cdot 10^{-4}$  рад для схем со статическими аберрациями и скомпенсированными аберрациями на выходе. Рассчитанные значения расходимости в два раза меньше экспериментально полученных. Причинами несовпадения результатов являются малая разрешающая способность гартманновского датчика (расстояние между элементами около 1,5 см) и мелкомасштабные неоднородности в реальных оптических системах.



а

б

Рис. 9. Расчетные пространственные характеристики лазерного излучения в схеме со статическими аберрациями, измеренными гартманновским датчиком:

а — форма волнового фронта; б — распределение интенсивности и энергии излучения в дальней зоне

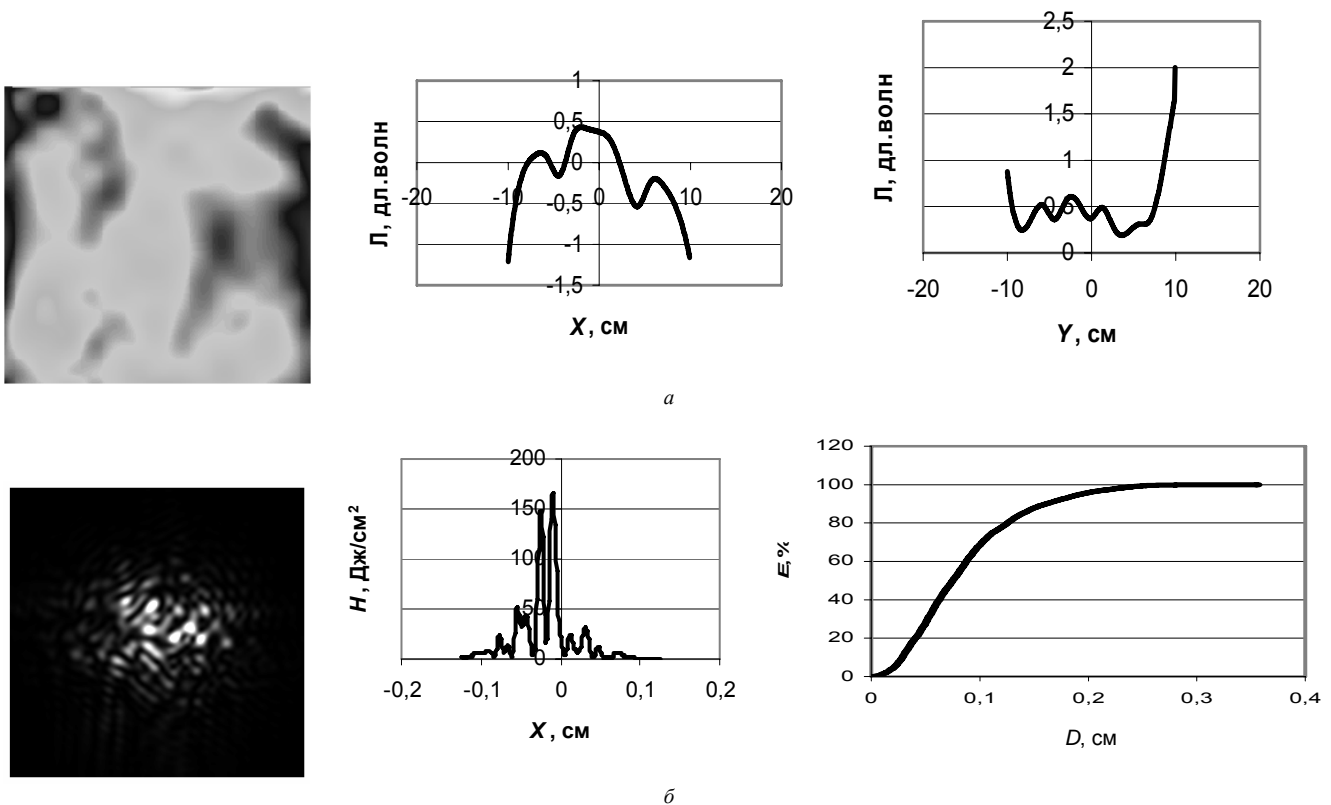


Рис. 10. Расчетные пространственные характеристики лазерного излучения в схеме со скомпенсированными суммарными аберрациями, измеренными гартманновским датчиком:

*a* — форма волнового фронта; *б* — распределение интенсивности и энергии излучения в дальней зоне

Измеренные волновые фронты хорошо совпадают с фронтами, полученными в смоделированных схемах со сферической аберрацией, астигматизмом и дисковыми активными элементами. Следовательно, крупномасштабные аберрации оптической системы в основном определяются погрешностью изготовления оптических элементов. Мелкомасштабные искажения поверхностей приводят к дальнейшему увеличению расходимости излучения. По результатам проведенных исследований намечены пути повышения качества оптической системы.

Проведены расчеты прохождения импульса с энергией 0,1 Дж и длительностью импульса 3 нс при значении коэффициента усиления для слабого сигнала 4,2 % на 1 см. Форма входного сигнала близка к прямоугольной, энергия излучения на выходе составляет 2,8 кДж. Пространственные характеристики излучения приведены на рис. 11, значения волнового фронта практически не изменились, расходимость по уровню 80 % энергии составляет  $5 \cdot 10^{-5}$  рад, что примерно в три раза меньше полученной экспериментально. При этом не учитывались тепловые аберрации и нелинейные эффекты. Для входного сигнала с супергауссовым распределением, близким к экспериментальному, с коэффициентом заполнения около 0,8 энергия излучения на выходе уменьшилась до 2 кДж, но волновые аберрации и расходимость заметно не изменились.

#### Экспериментальное исследование пространственных характеристик лазерного излучения

На этапе монтажной юстировки проводилась регистрация распределения излучения юстировочного пучка в плоскостях диафрагм пространственных фильтров на каждом проходе и на выходе тракта. С увеличением числа проходов аберрации схемы увеличиваются, и если на первом проходе расходимость излучения составила  $\sim 0,7 \cdot 10^{-5}$  рад, то на четвертом достигает  $2 \cdot 10^{-4}$  рад. Заметен астигматизм, который вызван общими ошибками изготовления поворотных зеркал, стоящих под углом  $45^\circ$ . В целом качество оптической системы остается удовлетворительным, но оно заметно ухудшилось после установки ДАЭ.

После постановки ДАЭ в усилители первого канала осуществлена юстировка оптических элементов, диафрагм пространственных фильтров на четырех проходах. Устранены вносимое ими поперечное смещение и виньетирование юстировочного пучка. По результатам регистрации ближней и дальней зон излучения на выходе силового тракта определено качество оптических элементов. Проведена отбраковка элементов со значительными свиями, что значительно улучшило качество излучения.

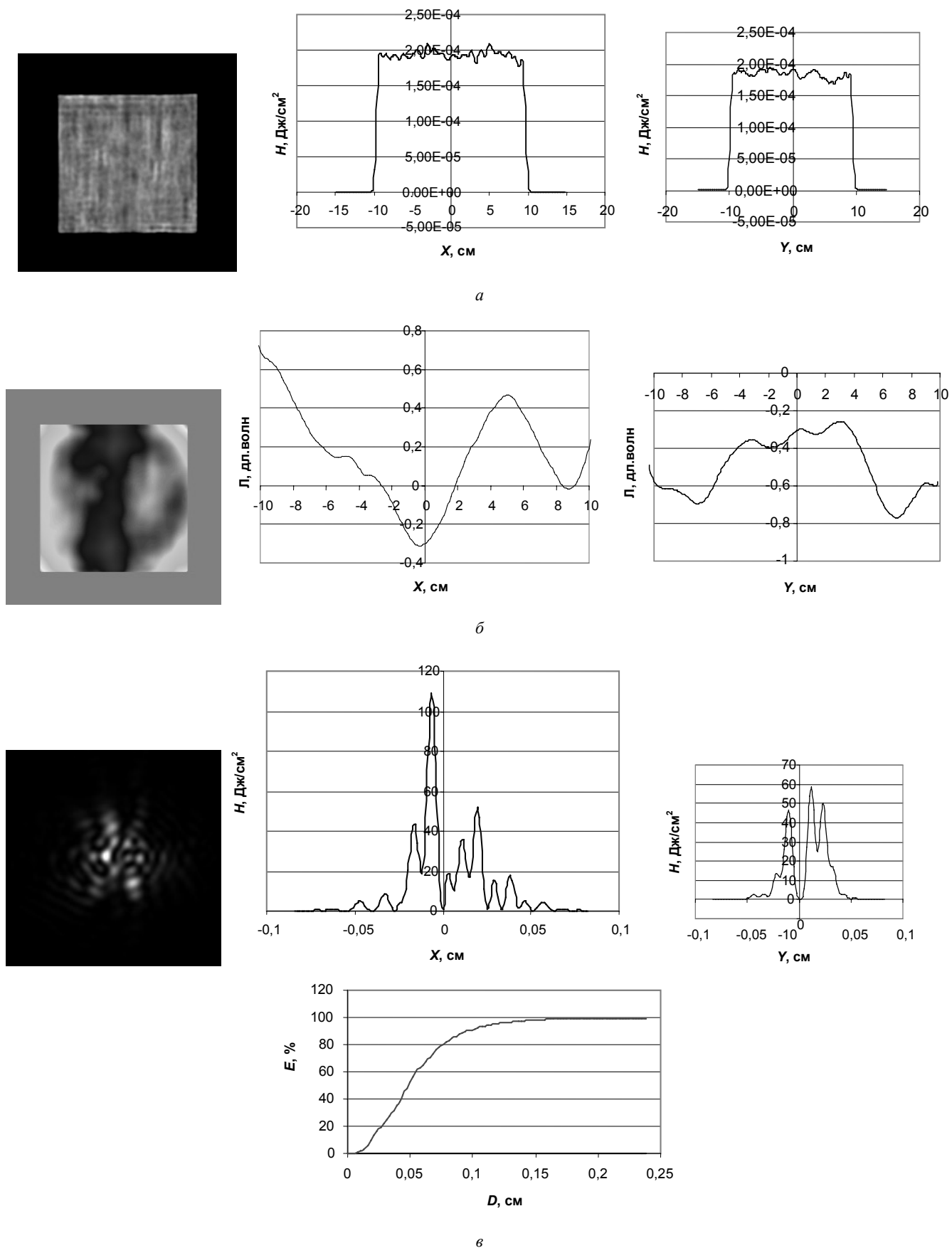


Рис. 11. Расчетные пространственные характеристики лазерного излучения с усилением в четырехпроходной схеме со сферической aberrацией и дисковыми активными элементами:  
 а — распределение интенсивности излучения в ближней зоне; б — форма волнового фронта; в — распределение интенсивности и энергии излучения в дальней зоне

Зарегистрированы искривление и искажение волнового фронта (дефокусировка) юстировочного пучка после постановки ДАЭ. Они имеют положительную оптическую силу, и так как стоят под углом Брюстера, приводят к значительному астигматизму. Дефокусировка устранена путем перемещения линз пространственных фильтров.

Частичная компенсация статических aberrаций на выходе канала с  $PV = 13,7$  мкм,  $RMS = 2,8$  мкм (рис. 12, *а*) до  $PV = 5,4$  мкм,  $RMS = 0,67$  мкм (см. рис. 12, *б*) осуществлялась путем дополнительного поворота линз кюветного пространственного фильтра на углы  $\Delta\theta \approx 1^\circ$ . Оставшиеся aberrации волнового фронта на входе канала компенсировались с помощью деформируемого зеркала адаптивной системы (АС) [3].

Таким образом, на выходе канала после четырех проходов был сформирован волновой фронт с параметрами  $PV = 2,2$  мкм,  $RMS \approx 0,4$  мкм (см. рис. 12, *в*).

Типичное изображение распределения в дальней зоне (в минимальном пятне каустики линзы  $F \approx 10$  м) приведено на рис. 13, *а*. Расходимость излучения по уровню 80 % энергии после четырех проходов составляет  $\theta_{0,8E} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  рад. Изображение излучения в ближней зоне и распределения плотности энергии по вертикальному сечению пучка приведены на рис. 13, *б, в*. Размер пучка на выходе канала составляет по уровню 10 % от максимума плотности энергии ( $\epsilon_{max}$ )  $18 \times 18$  см.

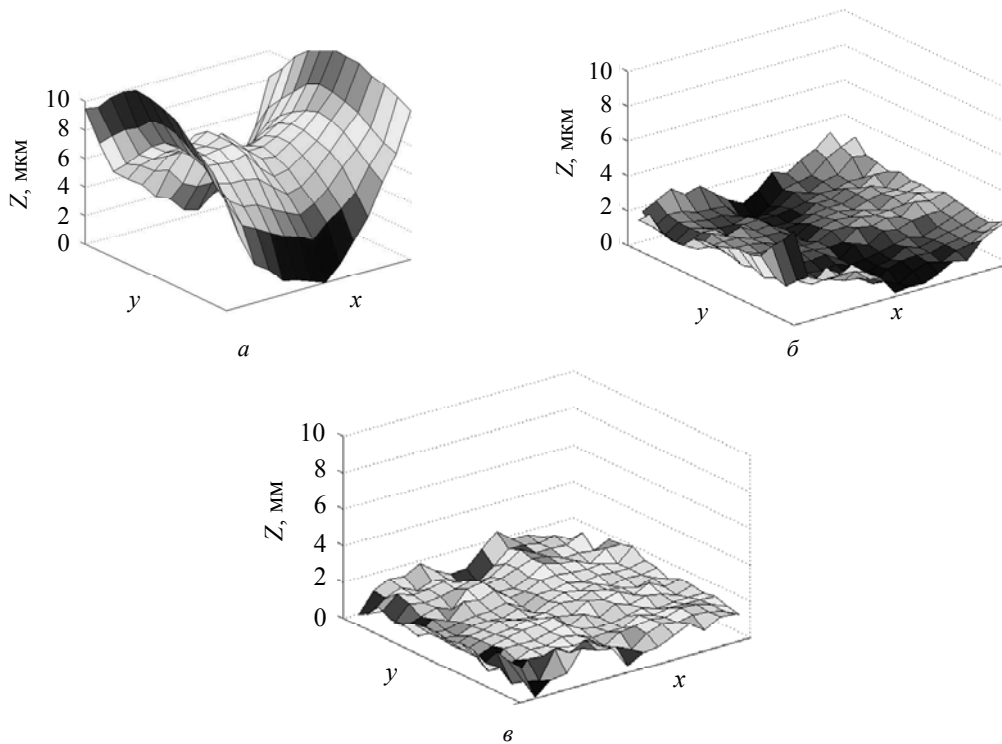
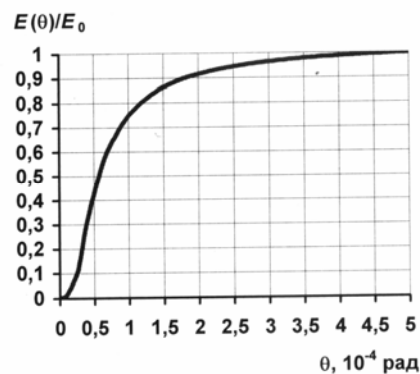
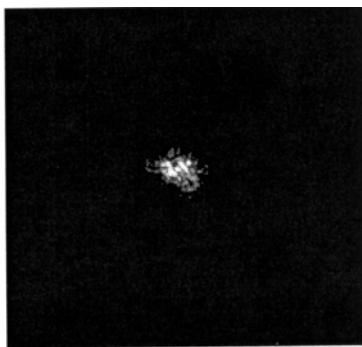
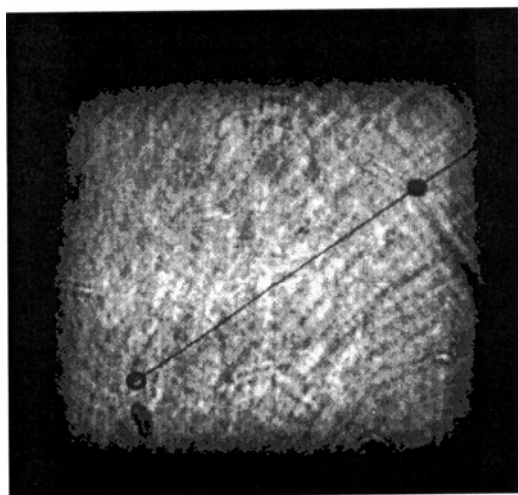


Рис. 12. Статические волновые aberrации оптического тракта. Вид и распределение энергии излучения в дальней зоне: *а* — до компенсации aberrаций; *б* — после компенсации aberrаций путем поворота линз КПФ; *в* — после компенсации aberrаций АС

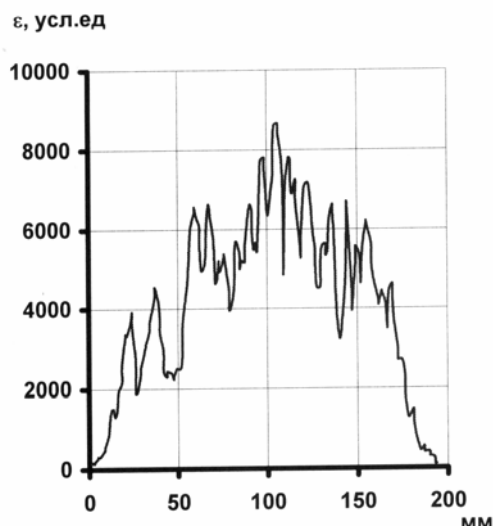


*а*

Рис. 13. Дальняя и ближняя зоны излучения на выходе канала после четырех проходов с компенсацией статических aberrаций волнового фронта деформируемым зеркалом при неработающих усилителях: *а* — вид и распределение энергии излучения в дальней зоне;



б



в

Рис. 13. Окончание:

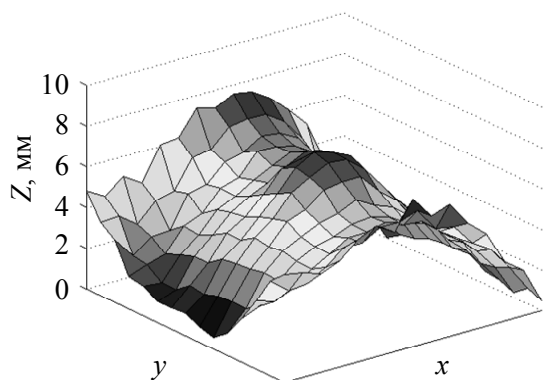
б — изображение пятна в эквивалентной БЗ плоскости (расстояние между масштабными метками 150 мм);  
 в — распределение плотности излучения по вертикальному сечению

**Пространственные параметры пучка на выходе канала в режиме усиления**

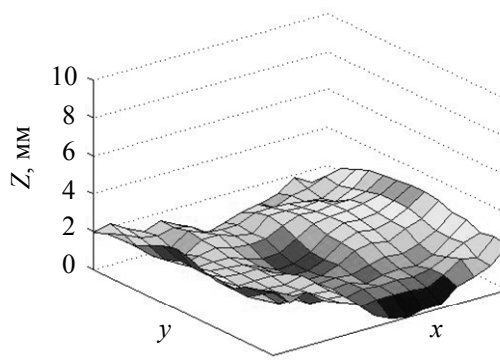
Усилительные эксперименты с включением накачки усилителей проводились в штатном режиме при напряжении  $U_r = 22$  кВ, что соответствует коэффициенту усиления  $g_0 = 4,25 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  [4]. В пространственных фильтрах стояли экспериментально подобранные диафрагмы с угловым размером  $(2-3) \cdot 10^{-5}$  рад, исключающим виньетирование пучка. Опыты проводились с компенсацией статических и тепловых aberrаций волнового фронта. Aberrации волнового фронта, задаваемые адаптивным зеркалом, были экспериментально определены посредством нескольких итераций в целях полу-

чения на выходе канала волнового фронта, наиболее близкого к плоскому (рис. 14).

В усилительных опытах на выходе канала aberrации волнового фронта составили  $PV = 3,3$  мкм,  $RMS = 0,65$  мкм. Характерное изображение распределения излучения в дальней зоне приведено на рис. 15 а, б. Расходимость излучения по уровню 80 % энергии составляет  $\theta_{0,8E} = 1,75 \cdot 10^{-4}$  рад, без накачки усилителей расходимость составляет  $\theta_{0,8E} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  рад. Увеличение расходимости примерно в 1,5 можно объяснить худшей компенсацией суммарных aberrаций волнового фронта с тепловыми aberrациями по сравнению с компенсацией статических aberrаций без включения накачки усилителей ( $PV = 2,2$  мкм,  $RMS = 0,4$  мкм).



а



б

Рис. 14. Суммарные aberrации оптического тракта в усилительном опыте на выходе канала:

а — до компенсации aberrаций при  $PV = 7,6$  мкм,  $RMS = 1,8$  мкм; б — после компенсации aberrаций при  $PV = 3,3$  мкм,  $RMS = 0,65$  мкм

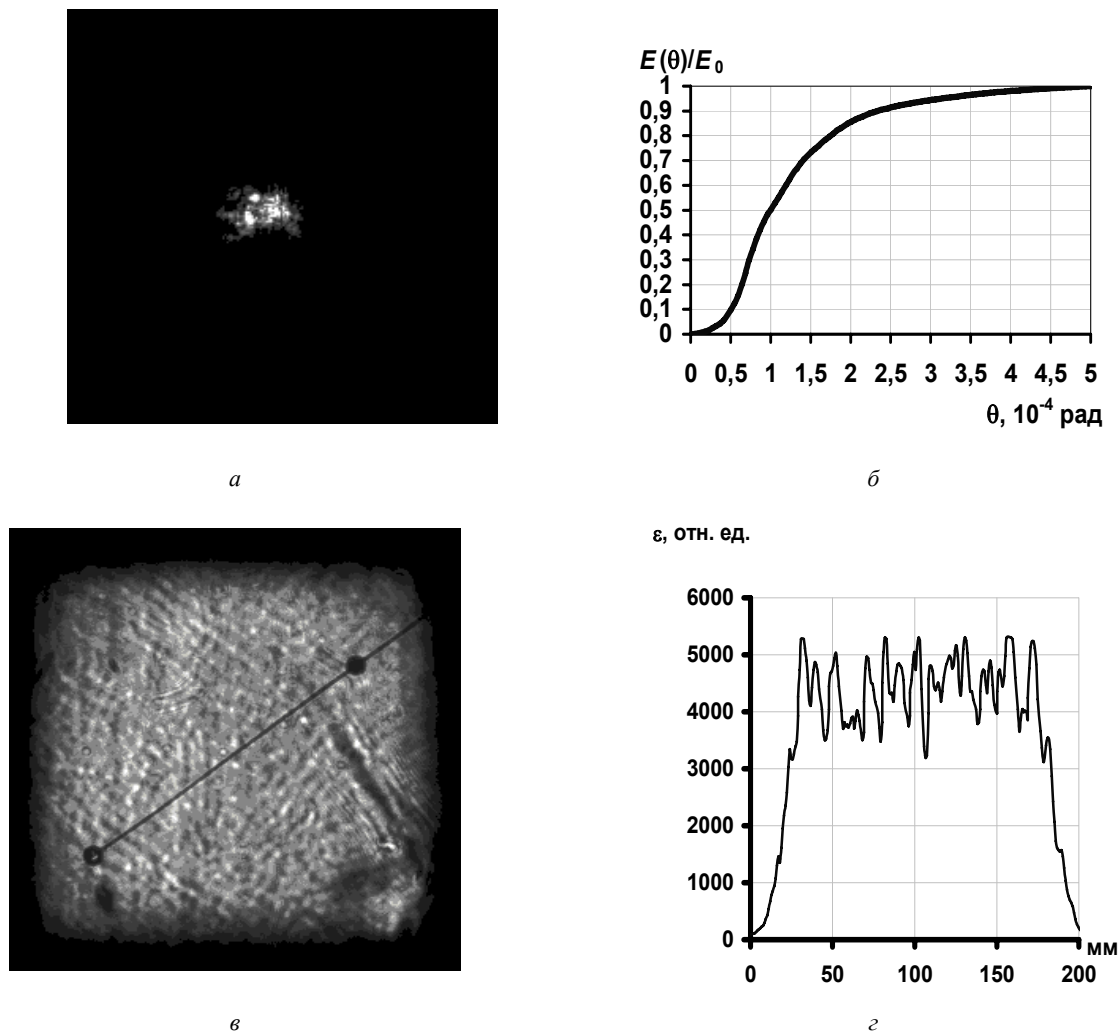


Рис. 15. Дальняя и ближняя зоны излучения на выходе канала после четырех проходов с полной компенсацией aberrаций (статических и тепловых) волнового фронта деформируемым зеркалом при работающих усилителях с напряжением накачки  $U_r = 22$  кВ:

*a* — изображение пятна излучения в фокальной плоскости линзы  $F = 7$  м; *б* — угловое распределение энергии излучения в дальней зоне ( $\theta_{0,8E} = 1,75 \cdot 10^{-4}$  рад,  $\theta_{0,9E} = 2,3 \cdot 10^{-4}$  рад,  $\theta_{0,95E} = 3,3 \cdot 10^{-4}$  рад); *в* — изображение БЗ плоскости (расстояние между масштабными метками 150 мм); *г* — распределение плоскости излучения по вертикальному сечению

При энергии входного сигнала (0,1—0,2) Дж энергия излучения на выходе канала составляла  $E_{out} = (1,3—1,8)$  кДж, при этом не замечено корреляции между значением расходимости и выходной энергией, что свидетельствует о том, что вклад самофокусировки в величину расходимости при данных условиях незначителен.

Изображение излучения в ближней зоне и распределения плотности энергии по вертикальному сечению пучка приведены на рис. 15, *в*, *г*. Размер пучка на выходе канала составляет по уровню 10 % максимума плотности энергии  $18 \times 18$  см.

#### Выводы

Разработанная оптическая система обладает минимальными расчетными aberrациями. Сферическая aberrация, дефокусировка и астигматизм скомпенсированы сдвигом и поворотом линз пространственных фильтров.

Проведена отбраковка элементов с оптическими неоднородностями, что значительно улучшило качество излучения.

Анализ влияния размера и положения диафрагм ПФ на распределение интенсивности излучения в ближней и дальней зонах позволил дать рекомендации в выборе их оптимальных размеров и определении требований к точности юстировки.

Оставшиеся aberrации волнового фронта компенсировались с помощью деформируемого зеркала адаптивной системы на входе канала. На выходе канала после четырех проходов был сформирован волновой фронт с параметрами  $PV = 2,2$  мкм,  $RMS \approx 0,4$  мкм. Расходимость излучения по уровню 80 % энергии составляет  $\theta_{0,8E} = 1,2 \cdot 10^{-4}$  рад. Размер пучка на выходе канала по уровню 10 % от максимума плотности энергии ( $\epsilon_{max}$ )  $18 \times 18$  см.

В усилительных опытах на выходе канала aberrации волнового фронта  $PV = 3,3$  мкм,  $RMS = 0,65$  мкм. Расходимость излучения по уровню 80 % энергии  $\theta_{0,8E} = 1,75 \cdot 10^{-4}$  рад.

Проведенная на основании данных расчетов и экспериментальных исследований оптимизация оптической системы позволила повысить равномерность распределения и увеличить размер излучения на выходе; получена энергия излучения в одном канале 3,3 кДж [5, 6].

#### Л и т е р а т у р а

1. Сухарев С. А. Мощная лазерная установка на неодимовом фосфатном стекле "Луч" — прототип модуля установки "Искра-6"; Доклад на III междунар. конф. SSLA to ICF. — г. Монтерей, США, 7—12 июня 1998.
2. Epatko I. V., Serov R. V. Advantages Fast Fourier Interpolation for high power laser simulation. IFSA05, Biarritz, France, abstract book, p. 229. www.wavesimsoft.com.

3. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И. и др. Уменьшение aberrаций волнового фронта и расходимости лазерного излучения на установке "Луч" с помощью адаптивной системы// Квантовая электроника. 2005. Т. 35 (2). С. 140.

4. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И. и др. Получение высокого коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с элементами из неодимового фосфатного стекла// Там же. 2004. Т. 34 (6). С. 509.

5. Боднар Ю. М., Воронич И. Н., Гаранин С. Г. и др. Исследования усиления лазерного импульса в канале четырехпроходной неодимовой установки "Луч": Доклад на XXXII Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. — г. Звенигород, 14—18 февраля 2005. С. 185.

6. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Илькаев Р. И. и др. Канал мощной установки "Луч" для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс// Квантовая электроника. 2005. Т. 35 (4). С. 299.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

## Rated-experimental optimization of the spatial performances of the Luch laser device

*N. V. Voronina, I. N. Voronich, S. G. Garanin, A. I. Zaretsky, L. V. Lvov,  
A. N. Manachinsky, O. A. Ryzhova, A. B. Smirnov, S. A. Sukharev,  
N. A. Filatova, I. E. Chernov*

Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov,  
Nizniy Novgorod Region, Russia

*I. V. Epatko, R. V. Serov*  
General Physics Institute, Moscow, Russia

*The numerical simulation of the laser facility "Luch" was done to account for the effects of various parameters: aberrations of the optical elements, the nonuniformity of materials, the fabrication errors, the size and displacements of diaphragms in spatial filters. The analysis of simulation results allowed to improve the quality of output radiation wavefront at the experiment.*