

ВЛИЯНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ НА РАБОТУ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА УСТАНОВКИ «ЛУЧ»

Гладкий Виталий Юрьевич (oeffimova@otd13.vniief.ru), Деркач Владимир Николаевич, Доронина Виктория Александровна, Тятюков Евгений Леонидович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе исследовано влияние воздушных потоков на качество коррекции волнового фронта (ВФ) силового канала установки «Луч».

В работе предложено использование воспроизводимости ВФ для количественной оценки влияния воздушных потоков. Исследована воспроизводимость ВФ при различных режимах работы системы кондиционирования воздуха. Выявлена корреляция модуля разности температур приточного воздуха и воздуха в чистом помещении с величиной воспроизводимости ВФ.

Предложено решение по модернизации системы кондиционирования воздуха и фильтрации, в целях снижения влияния системы на расходимость излучения до пренебрежимо малой величины.

Ключевые слова: адаптивная система, адаптивное зеркало, волновой фронт, система кондиционирования воздуха и фильтрации.

INFLUENCE OF AIR FLOWS ON THE «LUCH» FACILITY WAVEFRONT CORRECTION SYSTEM OPERATION

Gladky Vitaly Yurievich (oeffimova@otd13.vniief.ru), Derkach Vladimir Nikolaevich, Doronina Victoria Alexandrovna, Tyatyukov Evgeniy Leonidovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper presents investigation of the effect of air flows on the wavefront (WF) correction quality of the «Luch» facility power channel.

The use of the WF repeatability for quantitative assessment of the effect of air flows is proposed. The WF repeatability under different operating modes of the air conditioning system is investigated. Correlation between the temperature difference modulus of the supply air and air in a clean room and the value of the WF repeatability is revealed.

Solution for upgrading the air conditioning and filtration system is proposed to reduce the influence of the system on radiation divergence to a negligible value.

Keywords: adaptive system, adaptive mirror, wave front, air conditioning and filtration system.

Введение

В оптических системах многопроходных лазерных установок присутствуют искажения волнового фронта. Искажения обусловлены несовершенством изготовления оптических элементов и ошибками юстировки оптической схемы, нагрева активных

элементов во время накачки [1], и другими причинами.

Для компенсации искажений используют адаптивное зеркало (АЗ), входящее в состав системы коррекции волнового фронта (СКВФ) [2]. Перед силовым выстрелом ВФ на выходе канала должен принять форму, обратную термооптическим искажениям

ния такого подхода на установке «Луч», время должно быть значительно меньше одной секунды, что сопряжено с техническими сложностями.

Искажения, обусловленные воздушными потоками случайны. Существует численная характеристика случайной ошибки при измерении волнового фронта – воспроизводимость ВФ ($W_{r,rms}$) [6, 8].

($W_{r,rms}$) рассчитывается по формуле:

$$W_{r,rms} = \frac{1}{k} \times \sqrt{\sum_{n=1}^k \frac{\left(\frac{\sum_{x,y} E_n(x,y) [W_n(x,y) - \bar{W}(x,y)]^2}{\sum_{x,y} E_n(x,y)} - \left(\frac{\sum_{x,y} E_n(x,y) [W_n(x,y) - \bar{W}(x,y)]}{\sum_{x,y} E_n(x,y)} \right)^2 \right)}{k}} \quad (1)$$

где k – число измерений, n – номер измерения, $E_n(x, y)$ – распределение плотности энергии, $\bar{W}(x, y)$ – усредненный волновой фронт:

$$\bar{W}(x, y) = \frac{\sum_{n=1}^k E_n(x, y) W_n(x, y)}{\sum_{n=1}^k E_n(x, y)} \quad (2)$$

Для корректного расчета $W_{r,rms}$ используется серия ВФ длиной в 60 кадров. Регистрация производится с частотой 1 Гц.

Для выявления того, как воспроизводимость ВФ меняется на длительном интервале времени, была проведена регистрация ВФ с частотой 1 Гц в течение нескольких часов. Для каждых 60 последовательных волновых фронтов (что соответствует 1 минуте) было рассчитано $W_{r,rms}$. Поведение $W_{r,rms}$ с течением времени представлено на рис. 3.

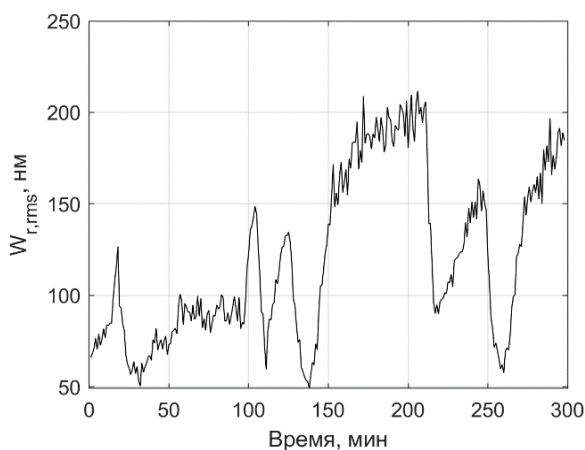


Рис. 3. Поведение $W_{r,rms}$ с течением времени

На представленной выше зависимости можно выделить области, где $W_{r,rms}$ подвержена незначи-

тельным флуктуациям, и области, где $W_{r,rms}$ меняется скачкообразно. Причиной быстрого изменения $W_{r,rms}$ может являться работа системы кондиционирования воздуха и фильтрации (СКВиФ), которая использует несколько режимов работы. Поэтому необходимо исследовать режимы работы СКВиФ.

Влияние различных режимов работы системы вентиляции на ВФ излучения на выходе канала

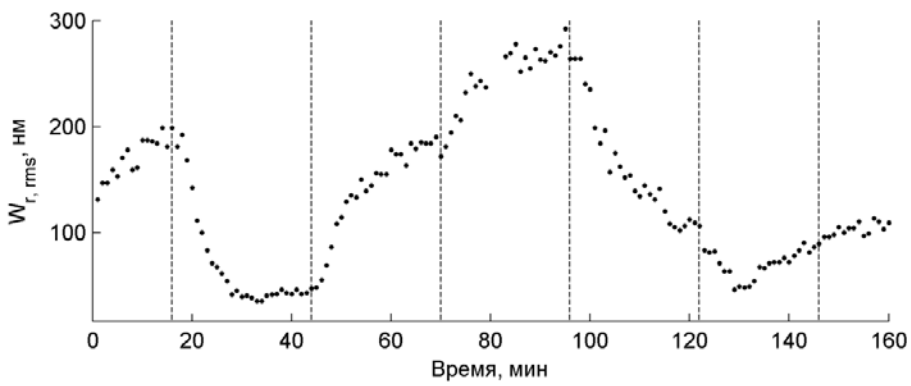
В задачи системы кондиционирования воздуха и фильтрации [7] входит обеспечение температурно-влажностного режима в оптическом зале.

Автоматическая работа СКВиФ установки «Луч» осуществляется в двух режимах: зимнем и летнем. В зимнем режиме температура воздуха в оптическом зале поддерживается за счет подогрева приточного воздуха с помощью электрического воздухонагревателя, который включает в себя 24 элемента одинаковой мощностью 6 кВт. Регулировка полной мощности воздухонагревателя осуществляется подбором количества включенных элементов. Температура воздуха в чистом помещении поддерживается в диапазоне $(23,2 \pm 0,5)$ °С.

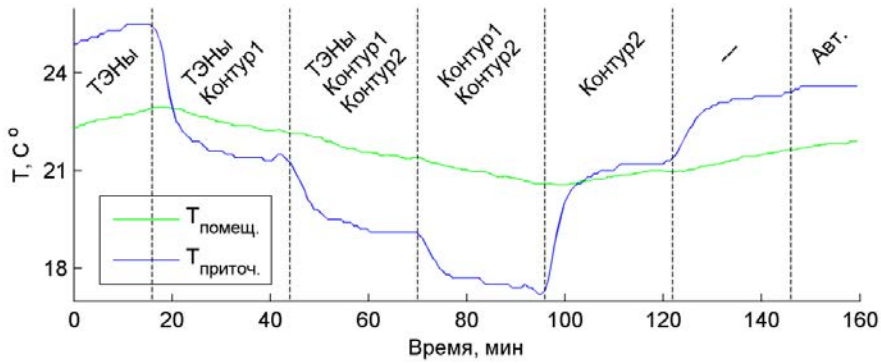
В летнем режиме температура воздуха в оптическом зале поддерживается за счет понижения температуры приточного воздуха с помощью охлаждающей установки, которая в свою очередь включает в себя два контура. При температуре воздуха в оптическом зале выше 23,5 °С включается первый контур охлаждающей установки. Второй контур включается, если уличная температура превышает 26 °С. Оба контура могут находиться только в двух состояниях: включенном и выключенном. Возможно включение в режиме ручного управления, в том числе одновременно, всех нагревающих и охлаждающих устройств, а именно ТЭНы, первый и второй контуры системы охлаждения.

Для исследования влияния различных режимов работы СКВиФ на воспроизводимость ВФ в принудительном порядке включались определенные комбинации устройств, управляющих температурой приточного воздуха, и удерживались в течение ≈ 25 минут. В течение всего времени производилась непрерывная регистрация волновых фронтов для дальнейшего расчета $W_{r,rms}$. Также проводилась регистрация температуры в чистом помещении и температуры приточного воздуха. Результаты измерений представлены на рис. 4. Пунктирными линиями отделены области, в которых удерживались определенные комбинации устройств, управляющих температурой приточного воздуха.

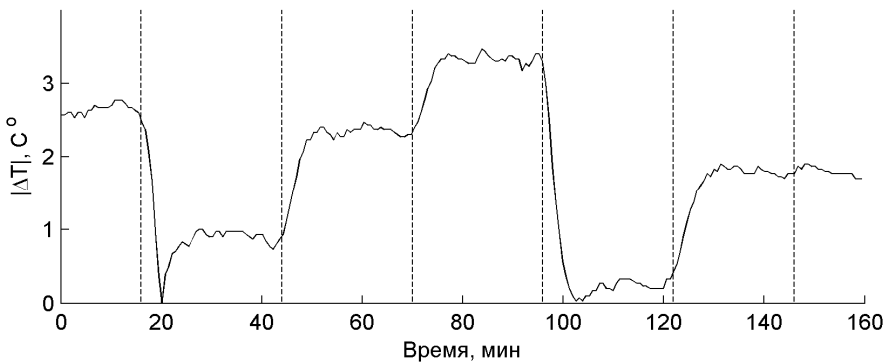
Из рис. 4 видно, что значения воспроизводимости ВФ и модуля разности $T_{\text{приточ.}}$ и $T_{\text{помещ.}}$ очень хорошо коррелируют. Когда температура приточного воздуха значительно отличается от температуры в чистом помещении, воспроизводимость ВФ ухуд-



а



б



в

Рис. 4. Зависимость воспроизводимости ВФ ($W_{r,rms}$) от режимов работы системы кондиционирования воздуха и фильтрации: а – график воспроизводимости ВФ ($W_{r,rms}$), б – графики температуры в чистом помещении $T_{\text{помещ.}}$ и температуры приточного воздуха $T_{\text{приточ.}}$, в – график модуля разности $T_{\text{приточ.}}$ и $T_{\text{помещ.}}$ ($|\Delta T|$)

шается (значение растет). Наиболее вероятное объяснение данного факта – это усиление конвективных потоков в оптическом зале.

Выявленная закономерность позволяет предположить, что существует некоторое оптимальное значение разницы температур приточного воздуха и воздуха в чистом помещении, при котором воспроизводимость ВФ имеет наилучшее значение (минимальное). Была предпринята попытка определения оптимальной разницы температур в зимний период. Выбор зимнего периода определен тем, что изменять

температуру приточного воздуха можно в ручном режиме с помощью изменения количества задействованных нагревательных элементов, с шагом менее $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В течении продолжительного промежутка времени производилось изменение разности температур приточного воздуха и воздуха в чистом помещении. В это же время производилась непрерывная регистрация волнового фронта на выходе установки для дальнейшего расчета воспроизводимости ВФ. На рис. 5 представлены графики разности температур и воспроизводимости ВФ.

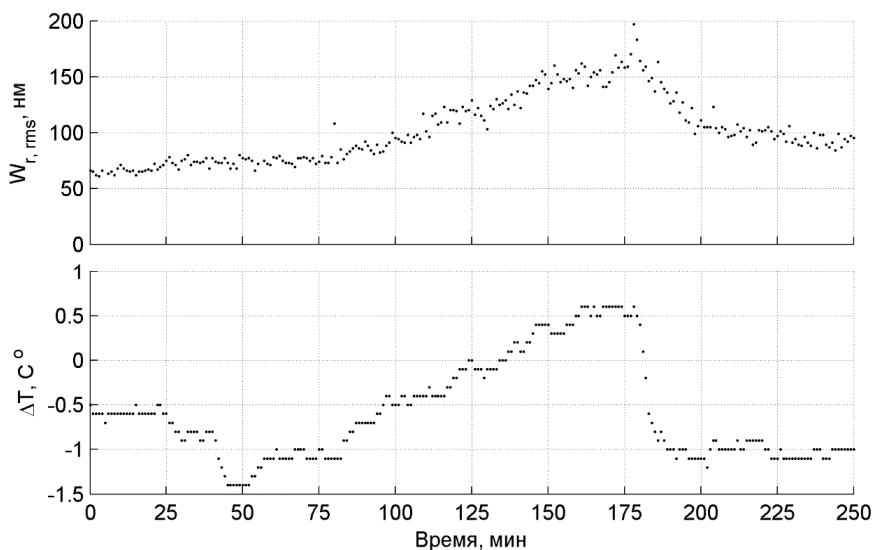


Рис. 5. Воспроизводимость ВФ при различных значениях разности температур приточного воздуха и воздуха в чистом помещении

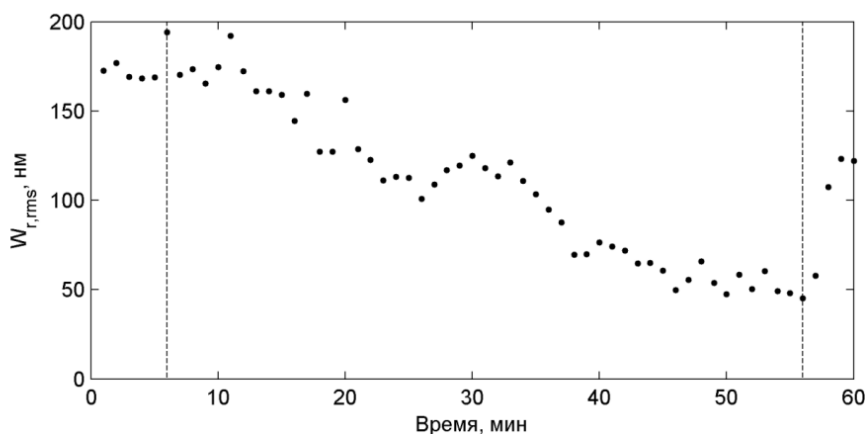


Рис. 6. Поведение воспроизводимости ВФ после отключения подачи приточного воздуха

В начальный момент времени температура приточного воздуха ниже температуры воздуха в чистом помещении на $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом величина воспроизводимости ВФ составляет около 60 нм . При всех дальнейших действиях воспроизводимость ВФ ухудшалась (значение росло). Такое поведение может быть свидетельством того, что из исследованных разностей температур, величина минус $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, наиболее близка к оптимальному значению. Предельное значение воспроизводимости ВФ за историю наблюдений составляет около 30 нм . Как видно из графика, этого значения не удалось достичь. Можно выделить две причины: 1) шаг изменения температуры, определяемый мощностью одного нагревательного элемента 6 кВт слишком большой; 2) ручной режим управления не подходит для поддержания разности температур на заданном уровне в течение длительного промежутка времени.

Для эффективного решения задачи поддержания заданной разности температур требуется модернизация СКВиФ, основными требованиями которой являются снижение шага регулирования температуры и организация автоматического режима поддержания разности температур воздуха в чистом помещении и приточного.

Существует режим работы СКВиФ принципиально отличающийся от вышеописанных – отключение подачи приточного воздуха в чистое помещение. На рис. 6 представлено изменение воспроизводимости ВФ после отключения подачи воздуха. Вертикальными пунктирными линиями обозначены моменты включения и отключения притока воздуха.

Воспроизводимость ВФ ожидаемо улучшается со временем после отключения притока воздуха. Спустя приблизительно 40 минут после отключения подачи воздуха значение $W_{r,rms}$ перестает существенно меняться и выходит на величину $\approx 50\text{ нм}$.

Связь расходимости излучения и воспроизводимости ВФ

Параметры ВФ являются важными характеристиками, тем не менее, в конечном итоге, работа СКВФ направлена на достижение минимальной расходимости на выходе канала. Поэтому следует выяснить связь между воспроизводимостью ВФ и расходимостью излучения.

Используя приближение дифракции Фраунгофера можно рассчитать распределение интенсивности в фокусе линзы, зная амплитуду и волновой фронт излучения[2]. Это распределение интенсивности можно использовать для определения расходимости излучения. Формула расчета интенсивности представлена ниже:

$$I_f(x_f, y_f) = \left| \iint_{-\infty}^{\infty} A(x, y) \exp \left[i \frac{2\pi W(x, y)}{\lambda} - i \frac{2\pi}{\lambda f} (xx_f + yy_f) \right] dx dy \right|^2, \quad (3)$$

где $A(x, y)$ – амплитуда, $W(x, y)$ – ВФ, λ – длина волны, f – фокуслинзы.

На рис. 7 представлены модельное распределение интенсивности, пример волнового фронта и полученного распределения интенсивности в фокусе линзы.

Можно выделить два режима работы СКВФ: с использованием мгновенного и усредненного ВФ для расчета управляющих напряжений адаптивного зеркала. Далее приведены результаты моделирования работы СКВФ в двух режимах. При моделировании предполагается, что адаптивное зеркало не имеет остаточной ошибки коррекции. При моделировании использовался набор W_k , $k = 0 \dots N$, представляющий собой последовательные измерения ВФ на

выходе канала установки «Луч», произведенные с частотой 1 Гц в течение нескольких часов.

В режиме работы СКВФ с использованием мгновенного ВФ, для коррекции используется некоторый волновой фронт W_i из серии W_k . С учетом используемых предположений, ВФ на выходе установки после коррекции будет $W_k - W_i$, $k = i + 1 \dots N$. В режиме работы СКВФ с использованием усредненного ВФ, для коррекции используется средний

ВФ: $W = \frac{1}{n} \sum_{k=i}^{k=i+n-1} W_k$. Тогда, после коррекции, ВФ

на выходе установки будет $W_k - \bar{W}$, $k = i + n \dots N$. При моделировании использована $n = 60$, т. е. усреднение ВФ производится в течение одной минуты.

После получения скорректированного ВФ производится расчет распределения интенсивности в фокусе линзы и далее определение расходимости. При этом предполагается, что после коррекции ВФ производится 60 последовательных выстрелов, в течение одной минуты. Это позволяет получить набор значений расходимости, обусловленной влиянием воздушных потоков, и поставить в соответствие этим данным значение воспроизводимости ВФ, также это дает представление о разбросе расходимости при конкретном значении воспроизводимости ВФ. На рис. 8 представлены данные результатов моделирования двух режимов работы СКВФ.

Как видно из графиков среднее значение расходимости, обусловленной влиянием воздушных потоков, линейно связано с воспроизводимостью ВФ. Разброс значений $(\Theta_{80})_{en}$ лежит в диапазоне от половины до полутора дифракционных пределов, в исследованном диапазоне значений $W_{r,rms}$, и ожидаемо растет с ростом $W_{r,rms}$. Воздушные потоки могут приводить к увеличению $(\Theta_{80})_{en}$ до 7 дифракционных пределов. Использование усредненного ВФ для

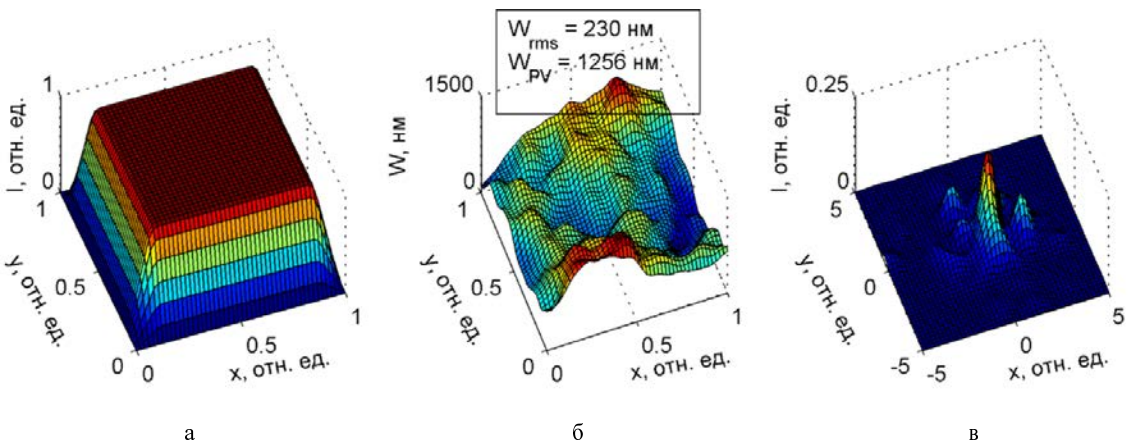


Рис. 7. Расчет распределения интенсивности в фокусе линзы: а – модельное распределение интенсивности, б – волновой фронт, в – полученное распределение интенсивности в фокусе линзы

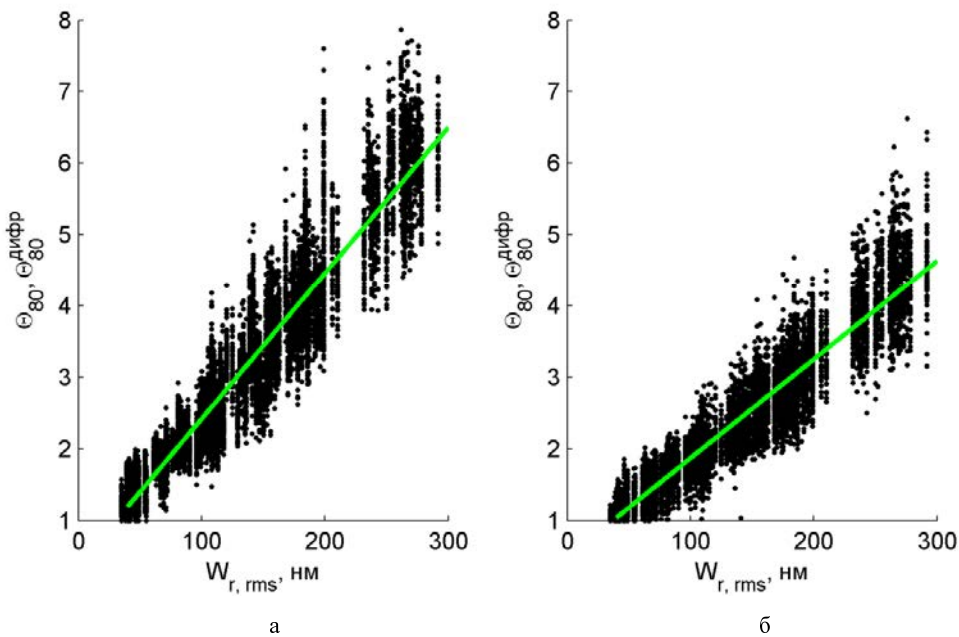


Рис. 8. Зависимость $(\Theta_{80})_{en}$ от $W_{r,rms}$ для режима работы: а – с коррекцией по мгновенному ВФ, б – коррекцией по усредненному ВФ

коррекции вместо мгновенного ВФ приводит к снижению расходимости на величину порядка 30 %.

В случае, когда воспроизводимость ВФ не превышает 50 нм, $(\Theta_{80})_{en}$ не превышает значения 1,5 дифракционного предела. В автоматическом режиме работы СКВиФ, воспроизводимость ВФ может достигать значения 30 нм. Этот факт позволяет предположить, что в результате модернизации СКВиФ, можно будет удерживать воспроизводимость ВФ в диапазоне до 50 нм. В этом случае влияние СКВиФ на расходимость не будет превышать 1,5 дифракционного лимита.

Заключение

В работе описаны результаты исследования влияния воздушных потоков на работу системы коррекции волнового фронта.

С помощью штатной системы регистрации ВФ было исследовано изменение волнового фронта ΔW за различные промежутки времени Δt . Показано, что основная доля изменений ВФ происходит за время менее одной секунды.

Проведены измерения $W_{r,rms}$ на выходе канала. При работе СКВиФ в автоматическом режиме воспроизводимость ВФ лежит в диапазоне от 30 до 270 нм, при этом расходимость лежит в пределах от менее 1,5 до 7 дифракционных.

Проведено исследование воспроизводимости ВФ на выходе канала при различных режимах работы СКВиФ. Выявлена корреляция $W_{r,rms}$ и модуля

разности температур приточного воздуха и воздуха в чистом помещении.

Исследовано поведение воспроизводимости ВФ после отключения подачи воздуха СКВиФ. На момент проведения эксперимента, было получено, что в течение 40 минут $W_{r,rms}$ улучшается до 50 нм и далее перестает существенно меняться.

Произведено моделирование режимов работы СКВФ с использованием для коррекции мгновенного и усредненного за минуту волновых фронтов. Среднее значение расходимости, обусловленной влиянием воздушных потоков, линейно растет с увеличением воспроизводимости ВФ. Расходимость при использовании для коррекции усредненного ВФ, меньше чем при использовании мгновенного ВФ на величину порядка 30 %.

Оптимальным решением проблемы с влиянием СКВиФ на качество коррекции ВФ является модернизация СКВиФ. Модернизация СКВиФ позволит поддерживать оптимальное значение разницы температур, что должно привести к уменьшению влияния СКВиФ на расходимость до величины 1,5 дифракционного лимита.

Список литературы

1. Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И. Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. С. 199. ил.
2. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установка. М.: Техносфера, 2012. С. 200.

3. Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Филатов А. А. Адаптивная оптика. СПб: НИУ ИТМО, 2012. С.291.

4. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев 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. С. 299 – 301.

5. Hartley R., Kartz M., Behrendt W., Wavefront correction for static and dynamic aberrations to within 1 second of the system shot in the NIF Beamlet demonstration facility. // 2nd Annual International Conference on Solid-State Lasers for Application to ICF, Paris, France, 22–25 октября, 1996.

6. ГОСТ Р ИСО 15367-2 - 2012. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений формы волнового фронта пучка лазерного излучения. Часть 2. Датчики Шока–Гартмана. 2013.

7. Руководство по эксплуатации системы СКВиФ ЧП.17.3.ОВ/РЭ.

8. ГОСТРИСО 15367-1 – 2012. Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений формы волнового фронта пучка лазерного излучения. Часть 1. Терминология и основные положения. 2013.