

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ХКИЛ С УГЛЕРОДНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

С. В. Маркин, А. А. Адаменков, Ю. А. Адаменков, В. А. Волков, Б. А. Выскубенко, С. П. Ильин, В. В. Кокишаров, Ю. В. Колобянин, В. А. Мазанов, Е. Н. Макейкин, С. А. Русин, А. В. Сиренко, Б. П. Якутов

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

Введение

Создание высокоэффективных химических кислородно-йодных лазеров (ХКИЛ) открыло новые перспективы научного и промышленного применения такого типа лазеров [1]. Сравнительно короткая длина волны (1,315 мкм) и высокая мощность излучения (более 50 кВт) ХКИЛ дают возможность проводить испытания и обработку различных материалов в условиях, которые невозможно получить с помощью других типов лазеров. Поэтому процесс взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) ХКИЛ с материалами представляет большой научный и прикладной интерес, что стимулирует исследователей к изучению особенностей воздействия такого излучения на различные материалы и созданию адекватных моделей взаимодействия.

Целью данной работы являлось исследование процесса взаимодействия излучения ХКИЛ с графитом на лазерных установках «КИЛ-10» и «Синглет».

В ходе выполнения работы был создан стенд для исследования взаимодействия ЛИ с материалами, включающий набор измерительных методик и измерительный комплекс с пакетом программного обеспечения, проведены экспериментальные исследова-

ния воздействия ЛИ ХКИЛ на графит, проведен анализ полученных данных, разработана численная модель взаимодействия и составлен баланс энергии.

Анализ экспериментов по воздействию ЛИ на углеродные материалы на лазерных установках «КИЛ-10» и «Синглет» позволяет качественно представить общую картину лазерного воздействия на образец. По принятой в [2] классификации воздействие излучения секундной длительности и плотностью мощности до нескольких кВт/см² принадлежит к тепловому механизму взаимодействия ЛИ с преградой. Излучение частично отражается от поверхности мишени, частично поглощается в слое материала, и за счет теплопроводности образец нагревается. Поверхность материала переизлучает часть поглощенной энергии в сплошном спектре. При достижении поверхностью образца температуры, при которой начинается разрушение материала образца в результате химических реакций и/или фазовых переходов, начинается истечение продуктов разрушения в окружающую среду. Образуется эрозионный факел над поверхностью мишени. Излучение, падающее на образец, ослабляется в факеле за счет поглощения и рассеяния и, в свою очередь, может разогревать факел (см. рис. 1,а).

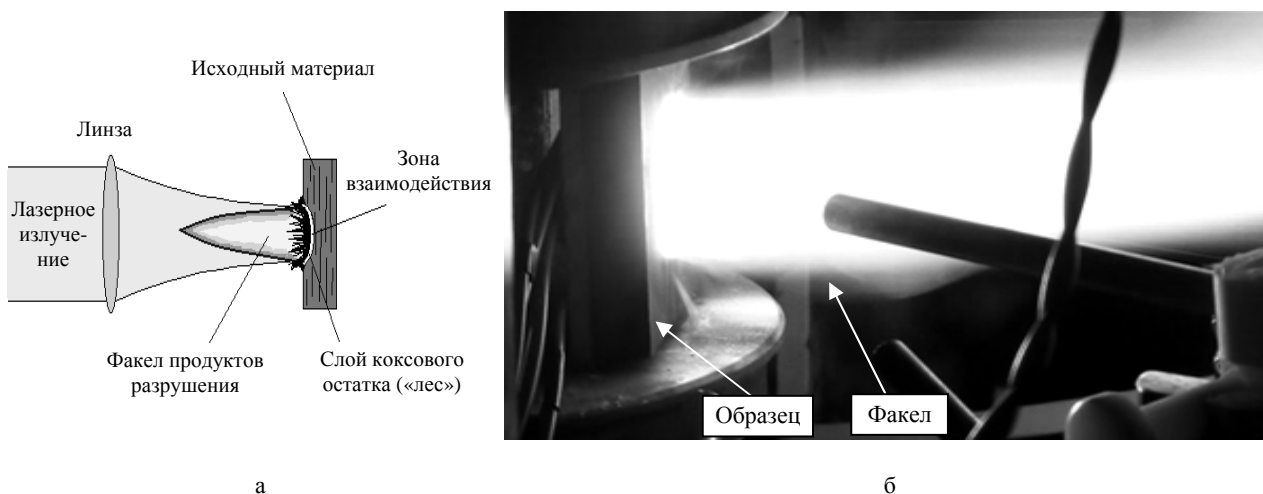


Рис 1. Процесс взаимодействия ЛИ ХКИЛ с графитом: а – схема процесса; б – фото факела

Балансовое уравнение квазистационарного процесса термохимического разрушения образца под воздействием лазерного излучения имеет вид [2]

$$cL\rho \frac{dT}{dt} = K(1-R)W_p - \varepsilon\sigma T_s^4 - m'H_{TX} - \lambda \frac{dT_n}{dx} - \alpha(T - T_0),$$

где L , c и ρ – толщина, теплоемкость и плотность образца; W_p – плотность мощности падающего лазерного излучения; K – коэффициент пропускания излучения продуктами разрушения образца; ε – коэффициент черноты; R – коэффициент отражения лазерного излучения исследуемого материала; T_s – температура мишени в фокальном пятне лазерного излучения; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент конвективного охлаждения; T_0 – температура окружающей среды.

Из уравнения видно, что для изучения характера воздействия ЛИ на образец и разработки модели взаимодействия лазерного излучения ХКИЛ с материалами необходимо проводить комплексные измерения различных параметров [3], т. е. одновременно определять оптико-физические характеристики вещества и на протяжении всего процесса воздействия контролировать следующие физические величины:

- мощность ЛИ;
- температуру лицевой поверхности образца;
- температуру тыльной поверхности образца;
- индикатрису рассеяния ЛИ на образце;

- коэффициент экстинкции факела;
- интегральную энергию, излученную образцом при воздействии ЛИ.

Стенд взаимодействия и измерительный комплекс

На рис. 2 показана структурная схема исследовательского стенда.

Лазерное излучение установок ХКИЛ «КИЛ-10» и «Синглет», на которых проводились экспериментальные исследования, имеет рабочую длину волны ЛИ $\lambda = 1,315$ мкм, время работы до $t_{\text{ЛИ}} \sim 10$ с. Мощность установки «Синглет» может достигать 5 кВт и более [4], а «КИЛ-10» – 50 кВт и более [1].

Энергия лазерного излучения измерялась калориметром типа ТПИ-2А и измерителем энергии типа L1500W-LP-CAL. Форма импульса излучения и его длительность – фотоприемником типа G8370-02 [1].

Измерение яркостных температур фронтальной поверхности образцов осуществлялось с помощью аттестованной многоканальной пирометрической методики МИВТ-1 на базе фотометрического блока разработки ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Для определения температуры и выбора необходимых для пирометрии участков спектра переизлучения исследуемого материала, наиболее близкого к излучению Планка [5, 6], в опытах регистрировался спектр теплового излучения образца и факела продуктов разрушения материала двумя спектрометрами типа HR2000 в диапазоне длин волн 250–1100 нм.

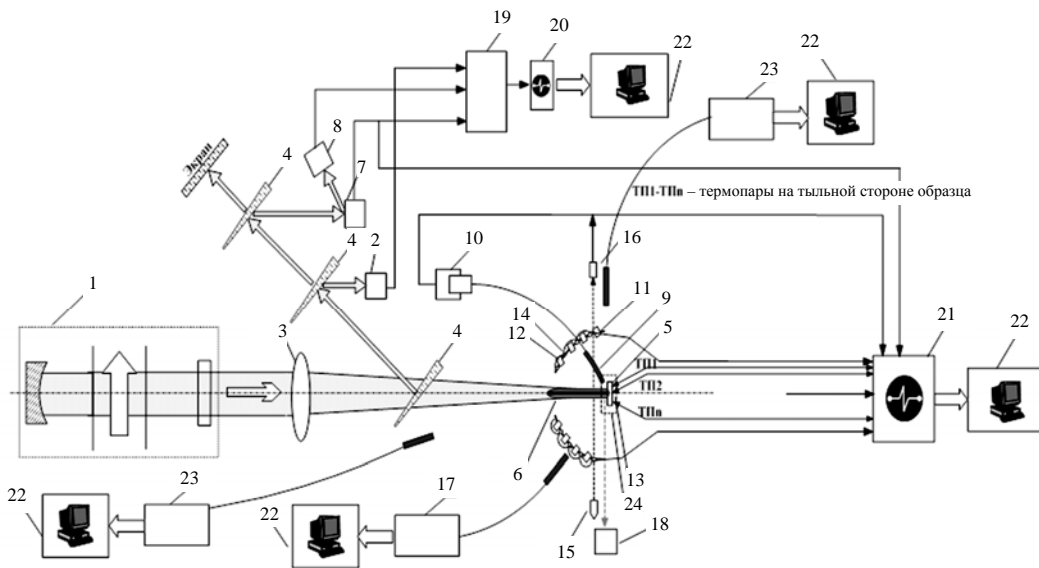


Рис. 2. Структурная схема исследовательского стенда: 1 – кислород-йодный лазер ($\lambda = 1,315$ мкм); 2 – измеритель мощности L1500W-LP-CAL; 3 – фокусирующая линза; 4 – делительная пластина; 5 – образец; 6 – факел; 7 – калометр ТПИ-2А; 8 – фотоприемник G8370-02; 9 – коллиматор; 10 – фотометрический блок; 11 – измерительная полусфера; 12 – позиции крепления фотодиодов; 13 – позиции крепления термопар; 14 – термодатчики (ИЛФИ); 15 – лазер ($\lambda \sim 1,3$ мкм); 16 – фотодиод с фильтром на $\lambda \sim 1,3$ мкм; 17 – пирометр FMP-1001; 18 – видеокамера; 19 – усилители системы сбора данных; 20 – осциллограф Tektronix 3012; 21 – многоканальная система сбора данных (АЦП + усилитель + ПО); 21 – ПК (промышленный, портативный или персональный ЭВМ + ПО); 22 – спектрометр HR2000; 23 – система предварительного нагрева; — — — электрические линии; \Rightarrow – цифровой сигнал; \curvearrowright – оптоволоконные линии; \Rightarrow – излучение ХКИЛ $\lambda = 1,315$ мкм

Измерение температуры тыльной поверхности образцов за пятном облучения и вне его осуществлялось с помощью аттестованной методики измерений температуры нагретого твердого тела МИТТ-1. В зависимости от уровня измеряемой температуры использовались вольфрам-вольфрамоплатиновые, хромель-копелевые и хромель-алюмелевые термопары. Как правило, температура тыльной поверхности образца измерялась с помощью 1–8 термопар, равномерно распределенных по его поверхности.

Для измерения отраженного и рассеянного рабочего излучения, а также полного излучения образца и факела при лазерном воздействии использовался метод измерительной полусферы, разработанной в ИЛФИ «РФЯЦ-ВНИИЭФ», с применением:

– фотодиодов типа ФД-10Г для измерения мощности отраженного и рассеянного излучения на рабочей длине волны (1,315 мкм). Измерения проводились по аттестованной методике измерения индикатрисы рассеяния МИИР-1;

– термодатчиков разработки ИЛФИ «РФЯЦ-ВНИИЭФ» для измерения интегрального по спектру распределения мощности излучения образца и факела продуктов разрушения (см. рис. 3,в). Температура нагрева термодатчиков измерялась термопарами с помощью термопарной методики МИТТ-1.

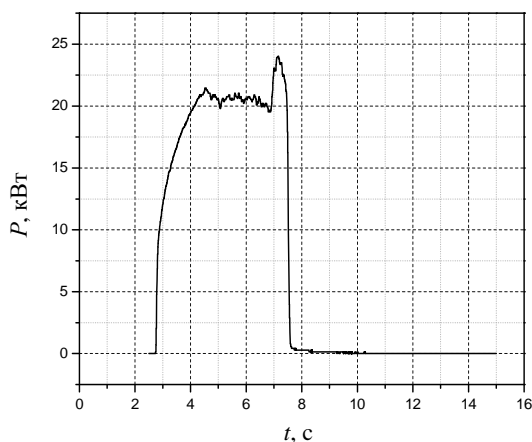
Видеосъемка процесса воздействия лазерного излучения, образования факела и разрушения образца проводилась с помощью цифровых видеокамер.

Регистрация сигналов с датчиков в экспериментах осуществлялась с помощью специально разработанного на современной элементной базе измерительного комплекса ИВК-13. Измерительный комплекс состоит из систем, предназначенных для регистрации сигналов от приемников различного типа, объединенных общей системой синхронизации. Это по-

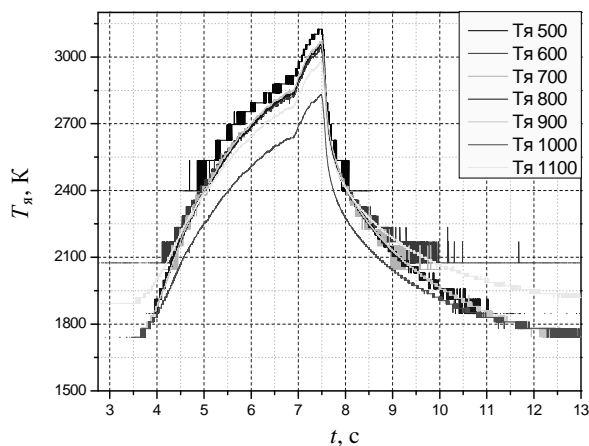
зволяет получать записи с привязкой к единому синхроимпульсу, выдаваемому управляющим комплексом установок «КИЛ-10» или «Синглет». В качестве регистратора данных использовались подключенные к персональным компьютерам платы аналого-цифровых преобразователей типа ЛА-1.5 и соответствующее программное обеспечение. Общее управление измерительной системой, а также последующая обработка полученных данных осуществлялись специально разработанным авторами пакетом программного обеспечения (ПО). В состав разработанного ПО входят: программы-регистраторы, предназначенные для управления измерительными системами; программы, предназначенные для работы измерительных систем в режиме проведения калибровок и градуировок зависимостей; программы комплексной обработки экспериментальных данных и анализа полученных результатов и программы для численного моделирования отдельных аспектов исследуемых процессов.

Результаты экспериментов, численного расчета и их обсуждение

С помощью разработанного стенда в экспериментах на лазерных установках «Синглет» и «КИЛ-10» были проведены измерения параметров взаимодействия ЛИ ХКИЛ с конструкционным графитом плотностью $1,7 \text{ г/см}^3$ при различных уровнях плотности мощности ($0,5\text{--}5 \text{ кВт/см}^2$) облучения. В экспериментах графитовый образец находился в атмосферном воздухе при комнатной температуре. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости, полученные в опытах. На рис. 4 представлены фотографии образцов после воздействия на них ЛИ ХКИЛ.

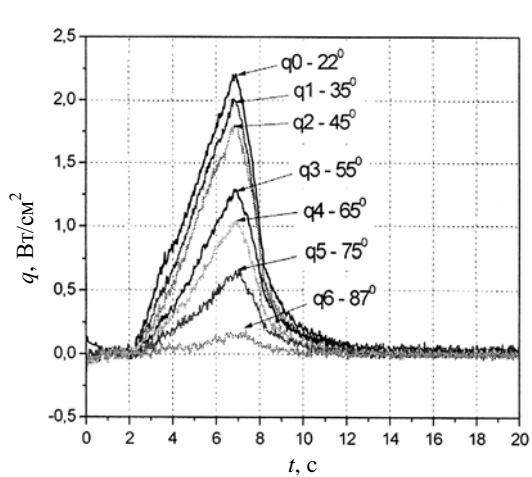


а

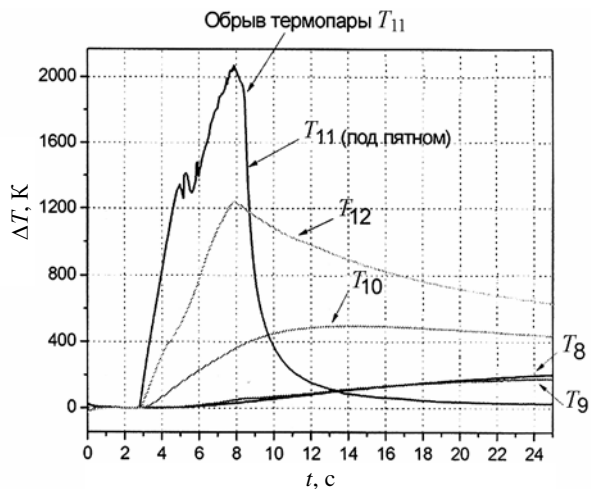


б

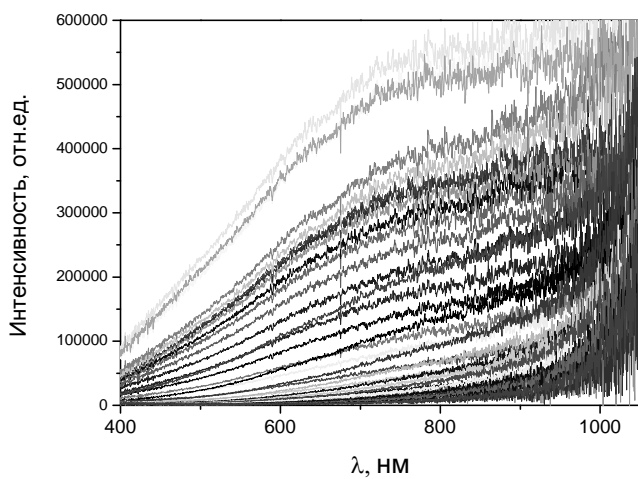
Рис. 3. а – зависимость мощности ЛИ от времени; б – яркостные температуры лицевой поверхности образца по МИТТ-1; в – отраженная удельная мощность ЛИ; г – температура тыльной поверхности образца по МИТТ-1; д – спектр теплового излучения образца. Окончание рисунка на с. 257



В



Г



Д

Рис. 3. Окончание

Зона воздействия 2 × 2,5 см



Зона воздействия 3 × 3 см

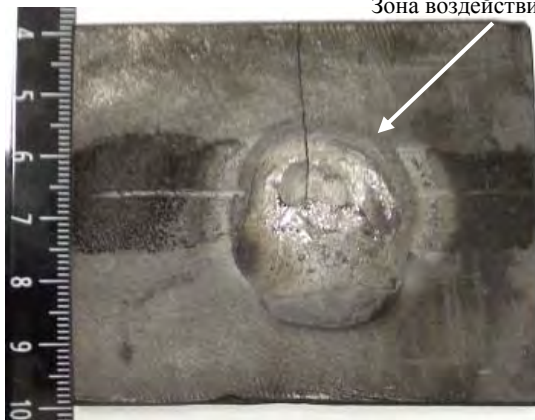


Рис. 4. Фотографии образцов после воздействия ЛИ ХКИЛ

Алгоритм комплексной обработки экспериментальных данных и получения количественных оценок физических величин, характеризующих процессы взаимодействия, проиллюстрирован с помощью блок-схемы на рис. 5.

Измерения, проведенные по методике определения индикатрисы рассеяния, показывают, что средний коэффициент отражения и рассеяния за время действия ЛИ равен $R \sim 25\text{--}30\%$. Таким образом, энергия, дошедшая до образца, составляет 70–75 % от полной энергии ЛИ.

Полученные в экспериментах зависимости яркостных температур от времени (см. рис. 3,б) позволяют определить излучательную способность ϵ и истинную температуру поверхности нагретого образца по расчетному методу, изложенному в [7, 8] и адаптированному авторами к конкретным условиям проведения испытаний материалов при облучении ЛИ.

На рис. 6 представлены оценки истинной температуры и зависимости излучательной способности от времени и температуры для одного из опытов.

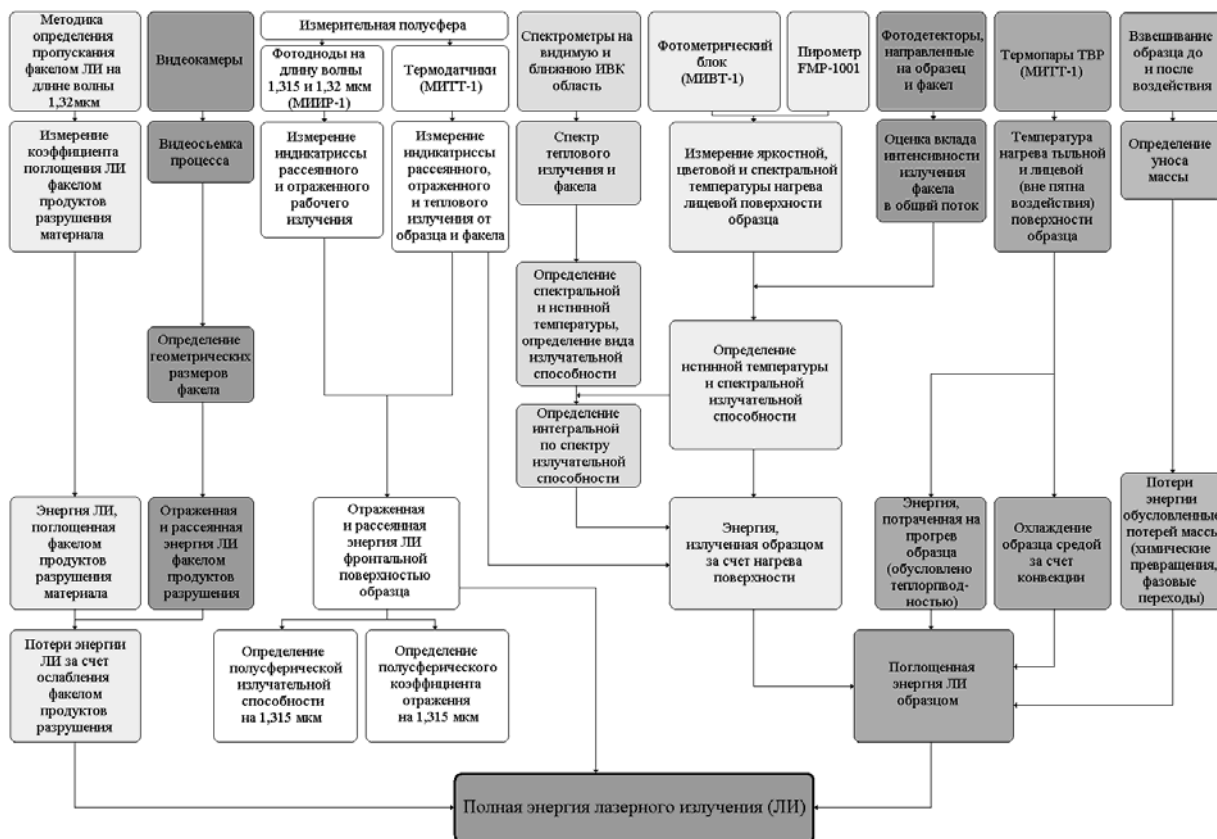
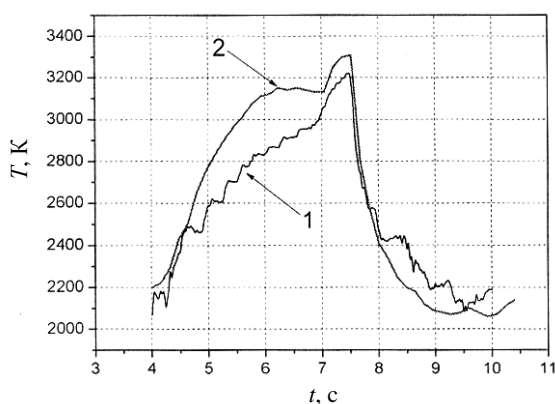
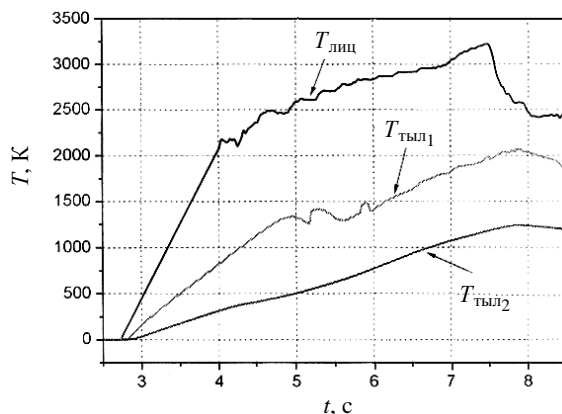


Рис. 5. Алгоритм комплексной обработки экспериментальных данных



а



б

Рис. 6. а – истинная температура, вычисленная по фотометрическому блоку (1), по спектрометру (2); б – сравнение лицевой и тыльной температуры образца ($T_{\text{тыл}1}$ – тыльная температура в центре пятна облучения, $T_{\text{тыл}2}$ – тыльная температу-

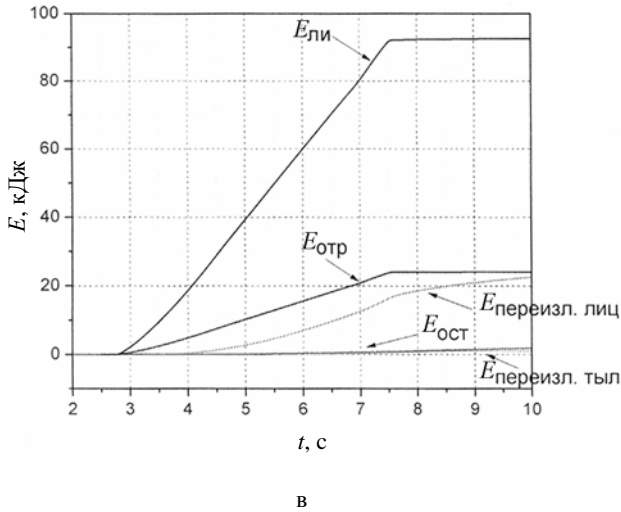


Рис. 6. Окончание

Расчеты истинной температуры, полученные с использованием различных моделей излучательной способности, показали, что температура лицевой поверхности образца при плотности мощности ЛИ 1–2 кВт/см² достигает максимума (~3200 К) в конце лазерного импульса (см. рис. 3,а).

Сравнение температуры лицевой и тыльной поверхности образца (см. рис. 6,б), а также вычисление оптико- и теплофизических параметров мишени по полученным экспериментальным данным позволяют оценить энергию лазерного излучения, поглощенную мишенью ~75 %, лучистые потери в сплошном спектре теплового излучения пятна воздействия ~20 % энергии ЛИ и энергию, идущую на нагрев мишени ~45 %.

Из полученного баланса энергии можно приблизительно оценить энергию, которая поглотилась при разрушении графитовой мишени в результате фазовых переходов, плавления и сублимации, эта энергия равна ~5 % от полной энергии ЛИ. Баланс энергии, оцененный по экспериментальным данным и составленный на момент окончания импульса, представлен на рис. 6,в и г. Полученные данные использовались при решении уравнения теплопроводности.

Расчетное моделирование нагрева лазерным излучением образцов материала выполнялось методом численного решения нестационарного двумерного уравнения теплопроводности, изложенного в [9, 10]. Этот метод был специально адаптирован авторами для решения задач лазерного нагрева непрозрачных твердых тел с учетом основных физических процессов, сопровождающих лазерное воздействие на материалы. Разработанная программа позволяет получать распределение температуры по объему и поверхно-

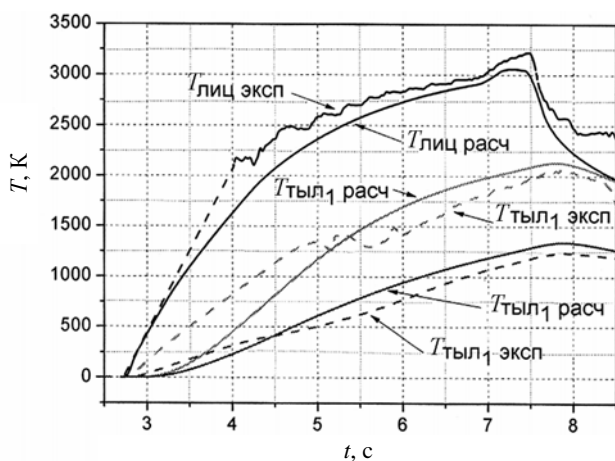
сти образца, нагреваемого ЛИ, рассчитывать потоки излучения в сплошном спектре с поверхности образца, учитывать энергию, потраченную на унос массы образца и ослабление лазерного излучения продуктами разрушения образца, находить общий баланс энергии при лазерном воздействии на образец.

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования одного из опытов.

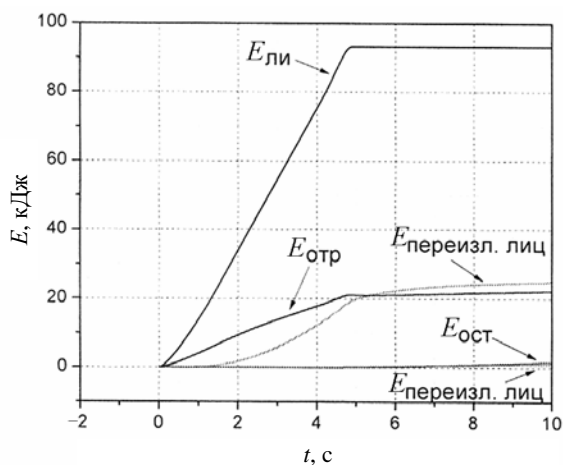
В результате численных расчетов получены временные зависимости температуры фронтальной и тыльной поверхности образца (рис. 7,а), поток излучения в сплошном спектре с фронтальной, боковой и тыльной поверхностей образца, общий баланс энергии при лазерном воздействии на образец (рис. 7,б и в).

Отметим удовлетворительное согласие с точностью не хуже 15 % расчетных значений температуры лицевой поверхности образца с пирометрическими измерениями и расчетной температуры на тыльной стороне образца с измерениями при помощи термопар (см. рис. 7,а). В целом, общий баланс энергии, определенный расчетным методом, согласуется с результатами, полученными по экспериментальным данным.

Анализ полученных данных показал, что отсутствие информации о точных значениях теплофизических и оптических характеристик используемого типа графита, а также зависимостей этих характеристик от температуры является серьезным препятствием для более корректного численного моделирования лазерного воздействия. Поэтому в дальнейшем предполагается разработать способ определения температурных зависимостей этих параметров из экспериментальных данных, получаемых непосредственно в процессе воздействия ЛИ на образец.



а



б



в

Рис. 7. а – зависимости температуры лицевой и тыльной поверхности образца от времени в процессе нагрева ($T_{\text{тыл}1}$ – тыльная температура в центре пятна облучения, $T_{\text{тыл}2}$ – тыльная температура на границе пятна); б – расчетный баланс энергии от времени; в – расчетный баланс энергии на момент окончания ЛИ

Заключение

1. Разработан испытательный стенд для исследования процессов взаимодействия ЛИ ХКИЛ с различными материалами с комплектом измерительных методик, с регистрирующим комплексом и пакетом управляющего и обрабатывающего программного обеспечения.

2. Проведены исследования взаимодействия ЛИ установок «КИЛ-10» и «Синглет» с конструкционным графитом.

3. Проведен комплексный анализ полученных экспериментальных данных и определен общий баланс энергии.

4. Разработана модель и проведено численное моделирование взаимодействия ЛИ с графитовым образцом. Показано согласие между расчетными и экспериментальными данными.

Литература

1. Адаменков А. А., Выскубенко Б. А., Ильин С. П. и др. Стенд для изучения перспектив промышленного применения кислородно-йодного лазера // Квантовая электроника. 2007. Т. 37, № 7. С. 601–602.
2. Захаров Н. С., Урлин В. Д., Шенцев Н. И. Тепловые, гидродинамические и плазменные эффекты излучения с веществом. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2004. С. 425.
3. Garnov S. V., Konov V. I., Silenok A. S. et al. Experimental study of temperature dependence of reflectivity and heat capacity of steels and alloys at continuous wave Nd:YAG laser heating. SPIE. Vol. 3093.
4. Адаменков А. А., Бакшин В. В., Выскубенко Б. А. и др. Масштабируемый химический кислород-йодный лазер // Тр. международ. конф. «Х Харитоновские те-

матические научные чтения», 14–18 марта 2008 г. Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 48–52.

5. Felice R. A. US Patent 5772323.

6. Felice R. A. Investment Casting Temperature Measurement, Foundry Management and Technology. Sept. 2006.

7. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. С. 259.

8. Khan M. A., Allemand C., Eagar T. W. Emissivity independent multi-wavelength pyrometer. Patent USA; N 5, 132, 922; 21 July; 1992.

9. Плотниченко В. Г., Пырклов Ю. Н., Свет Д. Я. Бесконтактное измерение истинной температуры и спектральной излучательной способности веществ в конденсированной фазе // ТВТ. 1999. Т. 37, № 3. С. 469–474.

10. Тихонов А. П., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1972.

11. Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978.