

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

### Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах

С 30 января по 2 февраля 2007 года в Московском гуманитарном университете состоялся IV Международный научный семинар «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах». Научный семинар проводился кафедрой математического и компьютерного моделирования и Математическим центром информационных технологий и моделирования МосГУ совместно с Институтом математического моделирования РАН при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №07-01-06008 г), Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, производственной фирмы «ФРЕГАТ» (г. Москва) под председательством профессора, доктора физико-математических наук, заведующего кафедрой В. И. Мажукина.

В работе Международного семинара приняли участие более 60 известных ученых из пяти стран: России, Беларуси, Франции, Германии и США. Российская сторона была представлена сотрудниками шести институтов РАН и четырех вузов.

**РОССИЯ.** Московский гуманитарный университет (МосГУ), г. Москва. Ректор МосГУ профессор, д.филол.н И. М. Ильинский, директор Математического центра информационных технологий и моделирования академик РАН Ю. И. Журавлев, проректор по учебной работе профессор, д.и. н. Б. А. Ручкин, директор Института гуманитарных ис-

следований, заместитель ректора по научно-исследовательской работе, профессор, д.филол.н. Вал. А. Луков, начальник Управления координации научных исследований д.филол.н. А. Б. Тарасов, зав. кафедрой математического и компьютерного моделирования профессор, д.ф.-м.н. В. И. Мажукин, доц. О. Н. Королева, доц. М. И. Маслова, доц. Т. В. Рамоданова, к.ф.-м.н. М. М. Демин, к.ф.-м.н. С. В. Кошевец, ст. преп. А. В. Мажукин.

**Институт математического моделирования РАН (ИММ РАН), г. Москва.** Директор ИММ РАН, член-корреспондент РАН, профессор, д.ф.-м.н. Б. Н. Четверушкин; профессор, д.ф.-м.н. В. И. Мажукин, профессор, д.ф.-м.н. В. А. Гасилов, профессор, д.ф.-м.н. А. П. Михайлов, к.ф.-м.н. А. И. Маслов, к.ф.-м.н. И. В. Попов, к.ф.-м.н. Л. Ф. Южно, к.ф.-м.н. А. С. Болдарев, С. В. Дьяченко, к.ф.-м.н. Е. И. Карташева, к.ф.-м.н. О. Г. Ольховская, к.ф.-м.н. П. В. Бреславский, аспирант Д. О. Устюгов, аспирант М. Г. Лобок, аспирант А. В. Мажукин.

**Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН), г. Москва.** Зам. директора Института общей физики РАН им. А. М. Прохорова профессор, д.ф.-м. н. С. В. Гарнов, к.ф.-м.н. С. Н. Андреев, г.н.с., д.ф.-м.н. А. А. Самохин, к.ф.-м.н. Т. Кононенко, к.ф.-м.н. С. К. Вартапетов, к.ф.-м.н. О. Г. Царькова, с.н.с. В. М. Вовченко, к.ф.-

м.н. С. М. Климентов, м.н.с. П. А. Пивоваров, А. А. Малютин.

**Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), г. Москва.** Профессор, д.ф.-м.н. Ю. А. Повещенко, к.ф.-м.н. С. Д. Устюгов, к.ф.-м.н. В. А. Галактионов.

**Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИРАН), г. Москва.** Д.ф.-м.н. А. П. Канавин, д.ф.-м.н. С. А. Урюпин, к.ф.-м.н. С. И. Кудряшов, В. Д. Зворыкин, А. А. Ионин.

**Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, г. Москва.** С.н.с. А. Г. Капительный, к.ф.-м.н. М. Е. Поварницын, к.ф.-м.н., с.н.с. К. В. Хищенко, П. Р. Левашов.

**Международный лазерный центр и физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва.** Профессор, д.ф.-м.н. А. А. Карабутов, д.ф.-м.н. Савельев, аспирант А. Ю. Ивочкин, М. В. Курилова, Д. С. Урюпина, Н. Моршедиан.

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.** Студент Д. В. Мелюков.

**Вятский государственный университет.** Профессор, д.т.н. В. В. Мелюков.

**Представители руководящих органов.** Начальник отдела науки и высоких технологий Аппарата Правительства РФ к.м.н. А. В. Мартыненко, зам. директора департамента научно-технической и инновационной политики Министерства образования и науки РФ к.ю.н. Е. Б. Балашов.

**РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ** была представлена двумя институтами Национальной Академии наук Беларуси. **Институт математики (ИМ НАНБ), г. Минск.** К.ф.-м.н. М. М. Чуйко. **Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск.** К.ф.-м.н., доцент К. И. Аршинов.

**ФРАНЦИЯ.** Laboratory of Laser, Plasmas, and Photonic Processing (LP3), CNRS, Marseille, France. D-r. T.E. Itina. Laboratoire des Solides Irradies, Ecole Polytechnique, Paris. D-r. A.S.Chuvatin. Ecole Nationale d'Ingenieurs de Saint-Etienne, DIPI Laboratory, Saint-Etienne Cedex 2, France. D-r. M. Doubenskaia. Laboratoire d'Optique Appliquee,

ENSTA — Ecole Polytechnique, France. D-r G. Mourou.

**ГЕРМАНИЯ.** Institute of Manufacturing and Welding Technology, Chemnitz, Germany. D-r Ulrich Semmler; D-r Klaus-Jurgen Matthes. University of Stuttgart, FGSW, Stuttgart, Germany. Prof. F. Dausinger.

**США.** Department of Biology, University of North Carolina at Chapel Hill, NC 27599, USA. A. Joglekar. Department of Biomedical Engineering, Center for Ultrafast Science, University of Michigan, MI 48109, USA. A.J. Hunt. Department of Physics, Arkansas State University, State University, AR 72467, USA. Stanley Paul, Kevin Lyon, Susan, D. Allen.

Семинар начал свою работу 31 января в кабинете риторики МосГУ. С приветственным словом к гостям семинара обратились: ректор МосГУ профессор, доктор философских наук И. М. Ильинский, проректор по учебной работе МосГУ профессор Б. А. Ручкин, зам. директора ИОФ РАН им. А. М. Прохорова по науке профессор, д.ф.-м.н. С. В. Гарнов.

С пленарными докладами выступили директор ИММ РАН член-корреспондент РАН профессор д.ф.-м.н. Б. Н. Четверушкин, профессор, д.ф.-м.н. В. И. Мажукин профессор, д.ф.-м.н. С. В. Гарнов, начальник отдела науки и высоких технологий Аппарата Правительства РФ к.м.н. А. В. Мартыненко, зам. директора департамента научно-технической и инновационной политики Министерства образования и науки РФ к.ю.н. Е. Б. Балашов.

Во второй половине дня 31-го января, 1-го и 2-го февраля было заслушано более 30 научных докладов. В ходе заседаний участниками научного семинара анализировались математические модели и результаты моделирования, полученные в последние годы в быстро расширяющейся и прогрессирующей области сильно неравновесных лазерно-плазменных процессов, применяемый и разрабатываемый SOFTWARE, экспериментальные исследования, свидетельствующие о необходимости применения методов математического моделирования.

Публикуем тезисы выступлений.

УЛЬТРАКОРОТКОЕ СВЕРХМОЩНОЕ  
ЛАЗЕРНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАТЕРИАЛЫ:  
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ

ПРОФ., Д.Ф.-М.Н. В. И. МАЖУКИН  
МОСКУ, ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА

Отличительной чертой ультракороткого лазерного воздействия является существенное изменение физики процессов, проявляющееся в быстрой смене основных физических механизмов при переходе от наносекундного к фемтосекундному воздействию. При этом возникает ряд вопросов фундаментального плана по поводу физических основ *нагрева, фазовых трансформаций, разрушения и удаления материала, возникновения и развития плазмы в неравновесных условиях, вызванных ультракоротким сверхмощным лазерным воздействием.*

Построение иерархии физико-математических моделей, и их решение будут способствовать более полному пониманию физических процессов, и позволят создать последовательную теоретическую основу ультракороткого лазерного воздействия на материалы.

Среди рассматриваемых моделей:

- начальная стадия неравновесного лазерного нагрева металлов и полупроводников в двухтемпературном приближении;
- неравновесная абляция, включающая механизмы быстрых фазовых переходов и ударных волн;
- электростатическое разрушение мишеней (модель кулоновского взрыва);
- гидродинамика металлов с глубоким заходом в метастабильную область в окрестности критической точки;
- неравновесные ионизационные модели;
- неравновесный перенос излучения и его спектры;
- модели неравновесной радиационной газовой динамики.

Математическое моделирование на основе данных постановок позволило установить

ряд новых физических эффектов, обусловленных сильной неравновесностью фазовых переходов в конденсированной среде и ионизационной неравновесностью в газобразных средах.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 07-07-00045; проект № 06-07-89191).*

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕССЫ ИСПАРЕНИЯ  
И ОБРАЗОВАНИЯ ПЛАЗМЫ

ПРОФ., Д.Ф.-М.Н. В. И. МАЖУКИН  
МОСКУ, ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА

Основными параметрами в проблемах лазерного воздействия являются: длина волны  $\lambda$ , интенсивность  $G$  и продолжительность импульса  $\tau$ . Длина волны определяет время возникновения оптического пробоя, влияет на формирование плазменного облака и в конечном итоге определяет количество испаренного вещества в облучаемой зоне. В представляемом докладе математическое моделирование используется для сравнения инфракрасного ( $\lambda=1,06 \mu\text{m}$ ) и ультрафиолетового ( $\lambda=0,248 \mu\text{m}$ ) лазерного воздействия на формирование плазмы и процессов испарения-конденсации на алюминиевой мишени. Анализ показал определяющую роль длины волны излучения в процессах испарения и плазмообразования.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №07-07-00045; проект №06-07-89191).*

ИЕРАРХИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
В ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА МАТЕРИАЛЫ

ПРОФ., Д.Ф.-М.Н. В. И. МАЖУКИН

Физическая картина процессов, протекающих в зоне лазерного воздействия, существенным образом зависит от таких парамет-

ров воздействия как интенсивность лазерного излучения  $G$ , длительности импульса  $\tau$  и энергии кванта лазерного излучения  $h\nu$ . Доминирующие механизмы в мишени (металл) и газовой среде (испаренное вещество, газ) в зависимости от интенсивности и длительности импульса представлены на рис. 1, 2.

Последовательность физических процессов на рис. 1, 2 предопределяет иерархию математических моделей, используемых для их описания.

**I-й этап — низкие интенсивности**  
 $10^3 < G < 5 \cdot 10^4 \text{ W/cm}^2$  и большие длительности  $\tau > 10^{-3} \text{ с}$ .

**Математические модели.**

*Мишень:* нелинейное многомерное уравнение теплопроводности. Для черных металлов дополнительно уравнения кинетики фазовых трансформаций в твердой фазе.

*Газовая среда:* многомерные уравнения теплопроводности и газовой динамики.

**II-й этап — умеренные интенсивности**  
 $10^4 < G < 5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$  и большие длительности  $10^{-6} < \tau < 10^{-2} \text{ с}$ .

**Математические модели.**

*Мишень:* Задача Стефана в классической постановке, уравнения гидродинамики в приближении Навье — Стокса.

*Газовая среда:* многомерные уравнения теплопроводности и газовой динамики.

**III-й этап: средние интенсивности**  
 $10^6 < G < 10^9 \text{ W/cm}^2$  и длительности  $10^{-7} < \tau < 10^{-4} \text{ с}$ .

**Математические модели.**

*Мишень:* неравновесные модели Стефана для поверхностного плавления и испарения, уравнения гидродинамики в приближении Навье-Стокса.

*Газовая среда:* газовая динамика с ударными волнами.

**IV-й этап: — высокие интенсивности**  
 $10^8 < G < 5 \cdot 10^{12} \text{ W/cm}^2$  и короткие импульсы  $10^{-10} < \tau < 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ .

**Математические модели.**

*Мишень:* неравновесные гидродинамические модели Стефана для поверхностных и объемных процессов плавления и испарения с ударными волнами.

*Газовая среда:* неравновесная радиационная газовая динамика, столкновительно-радиационные модели, уравнения переноса неперывного и линейчатого излучения.

**V-й этап — сверхвысокие интенсивности**  
 $10^{12} < G < 5 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$  и ультракороткие длительности  $10^{-15} < \tau < 10^{-11} \text{ с}$ .

**Математические модели.**

*Мишень:* модели неравновесного нагрева, плавления и испарения конденсированных сред с учетом термо- и фотоэмиссии.

*Газовая среда:* модели оптического пробоа с неравновесной кинетикой фото и туннельной ионизации атомов и молекул.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №07-07-00045; проект №06-07-89191).*

FINITE ELEMENT MODELLING OF PTA  
 WELDING FOR THE RESIDUAL STRESSES  
 ASSESSMENT OF VALVE CONES  
 AND SEAT RINGS

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ  
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ  
 НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ  
 НАПЛАВЛЕННОЙ СВАРКЕ ВЕНТИЛЬНЫХ  
 КОНУСОВ И КОЛЕЦ

ULRICH SEMMLER; KLAUS-JURGEN MATTHES.  
 INSTITUTE OF MANUFACTURING AND WELDING  
 TECHNOLOGY, CHEMNITZ UNIVERSITY  
 OF TECHNOLOGY, GERMANY

Besides of structure transformations the high local heat flux during welding may cause high residual stresses in the constructional elements. In the parts, which underlie high thermal and mechanical loadings, high stresses (superposition of residual and working ones) influence negatively and the lifetime as well as reduce the possible load level. The paper deals with the hard-facing of big diesel engine valves. Cobalt based hard materials (Stellite) are deposited by means of Plasma-Transfer-Arc (PTA) welding both on valve cones and seat rings. The welding processes and the treatment before and

after welding are modeled with Finite Elements (F.E.) using the F.E. codes SYSWELDTM and ANSYS(r). The aim of the F.E. simulation is the assessment and the reduction of the residual stresses in the deposit layers and heat affected zone. The multilayer deposit welding with a weaving plasma torch requires a special heat source in the context of programmable SYSWELDTM heat sources. The energy distribution of the source parameters and some of the thermal boundary condition are known insufficiently. They are calibrated using temperature measurements. The numerical simulations are accompanied by residual stress measurements. The presented work is the result of several industrial research and development projects.

[Перевод:]

Концентрированный поток энергии при сварке кроме структурных изменений может вызывать остаточные напряжения. В деталях машин, которые подвергаются высоким термическим и механическим нагрузкам, высокие внутренние и внешние напряжения отрицательно влияют на функциональность, срок службы и уменьшают допустимую нагрузку.

В докладе рассматривается наплавление твердых материалов на основе Кобальта (Стеллиты) на конусы и кольца вентилях с помощью плазменной сварки. Сварочные процессы и теплообработка до и после сварки моделировались методом конечных разностей с использованием программ SYSWELDTM и ANSYS®. Моделирование проводилось с целью оценки и уменьшения остаточных напряжений в наплавленных слоях и в зоне термического влияния. Моделирование плазменной сварки требовало программирования специального источника в рамках программы SYSWELDTM. Незвестные параметры источника и некоторые граничные условия моделей были определены по экспериментальным данным. Результаты вычислений сравнивались с измерениями остаточных напряжений. Результаты получены в рамках различных индустриальных проектов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДОВЫХ  
КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР  
ПРИ МНОГОЧАСТОТНОМ  
ЛАЗЕРНОМ ЗОНДИРОВАНИИ АКТИВНОЙ  
СРЕДЫ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРА

<sup>1</sup>К. И. АРШИНОВ, <sup>1</sup>М. К. АРШИНОВ,

<sup>2</sup>Н. С. ЛЕШЕНЮК, <sup>3</sup>В. В. НЕВДАХ

<sup>1</sup>ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ  
НАН БЕЛАРУСИ, ВИТЕБСК

<sup>2</sup>МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А. Д. САХАРОВА, МИНСК

<sup>3</sup>ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМ. Б. И. СТЕПАНОВА  
НАН БЕЛАРУСИ, МИНСК

По эффективности, надежности в работе, простоте изготовления, качеству генерируемого излучения и, наконец, стоимости мощные технологические CO<sub>2</sub>-лазеры в настоящее время превосходят все другие типы лазеров. Использование поперечного высокочастотного разряда открыло возможности создания ультракомпактных планарных волноводных CO<sub>2</sub>-лазеров с уровнем мощности до нескольких киловатт в непрерывном режиме, габариты и масса которых позволяют их использование в автоматизированных технологических линиях. Правильность и точность расчета энергетических характеристик лазеров, возможность их оптимизации определяются используемой теоретической моделью. Для проверки используемой модели необходима корректная диагностика активной среды CO<sub>2</sub>-лазеров. Актуальной задачей является разработка методики определения распределения населенностей по колебательным уровням молекулы CO<sub>2</sub> и/или ее колебательных температур, а также температуры газа в условиях активных лазерных сред. Кроме того, исследование колебательной кинетики позволит связать определяемые населенности лазерных уровней с временами их колебательной релаксации в реальных условиях активных лазерных сред. Все это необходимо для оптимизации работы CO<sub>2</sub>-лазеров, что особенно важно в случае мощных технологических лазерных систем.

## РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ БЫСТРЫХ Z-ПИНЧЕЙ

В. А. ГАСИЛОВ, С. В. ДЬЯЧЕНКО,  
О. Г. ОЛЬХОВСКАЯ,  
ИММ РАН, МОСКВА  
А. С. ЧУВАТИН, ECOLE POLYTECHNIQUE,  
PALAISEAU, FRANCE

Плазменные оболочки, сформированные в результате пропускания мультимегаамперного токового импульса по цилиндрической сборке металлических проволочек, относятся к наиболее интенсивным лабораторным источникам рентгеновского излучения [1]. Многозарядная плазма такого «быстрого» Z-пинча ускоряется до ~300-500 км/сек и излучает в мягком рентгеновском диапазоне при схождении к оси разрядной камеры. Наиболее существенными механизмами генерации мощного импульса излучения в быстром Z-пинче считаются конверсия кинетической энергии тормозящейся плазмы в тепловую, а также диссипация магнитной энергии пинча в сжатом состоянии [1, 2]. Таким образом, мощность излучения определяется плотностью и скоростью сжимающейся оболочки. Различного рода гидродинамические и термические неустойчивости, сопровождающие магнитную имплозию, делают финальное состояние пинча неоднородным и даже турбулизированным, и, тем самым, существенно влияют на выход рентгеновского излучения.

В настоящей работе численно исследовано влияние релей-тейлоровской неустойчивости пинча на основе многопроволочной сборки, использованной в экспериментах на установке «Z» в Сандийской лаборатории США [1]. Моделирование сжатия оболочки 20-мегаамперным импульсом длительности ~100 нс выполнено посредством кода MARPLE [4] в цилиндрической r-z геометрии. Формирование диффузной оболочки моделируется при условии стохастически возмущенного начального состояния оболочки. В расчетах получены количественные оценки влияния уровня начальных возмущений на выход излучения пинча.

### *Литература:*

1. R. B. Spielman, C. Deeney et al., Phys. Plasmas. V. 5. 1998. P. 2105.
2. Aleksandrov V. V. Branitskii A. V. et al. Dynamics of Heterogeneous Liners with Prolonged Plasma Creation. — Plasma Physics Reports, V. 27, №2, 2001. P. 89–109.
3. Chittenden J. P., Lebedev S. V. et al. X-ray generation mechanisms in three-dimensional simulations of wire array Z-pinches. — Plasma Phys. Control. Fusion 46 (2004) B457-B476 PII: S0741-3335(04)85706-3.
4. Гасилов В. А., Чуватин А. С. и др. Матем. моделирование, 2003. Т. 15. №9. С. 107.

### КОД MARPLE — НОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РАДИАЦИОННОЙ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ

В. А. ГАСИЛОВ, А. С. БОЛДАРЕВ, С. В. ДЬЯЧЕНКО,  
Е. И. КАРТАШЕВА, О. Г. ОЛЬХОВСКАЯ,  
ИММ РАН, МОСКВА

Код MARPLE разработан в ИММ РАН для вычислительных экспериментов с моделями высокотемпературных течений плазмы типа Z-пинч, для которых существенным является перенос лучистой энергии. Теоретической основой кода служит модель течения плотной плазмы в одножидкостном магнитогидродинамическом (МГД) приближении С. И. Брагинского, дополненная уравнением переноса лучистой энергии. МГД-уравнения рассматриваются для так называемого 2.5-мерного объекта. Это означает, что векторы, характеризующие процессы в плазме, представлены всеми тремя пространственными компонентами: скорость  $V=(u,w,v)$ , магнитная индукция  $B=(B_r, B_\phi, B_z)$ , напряженность электрического поля  $E=(E_r, E_\phi, E_z)$ , каждая из которых является функцией 2-х пространственных координат. Учитывается анизотропия диссипативных процессов в присутствии магнитного поля. Баланс внутренней энергии представлен двухтемпературной моделью, описывающей электронную релаксацию. Предусматривается

возможность использования табличных уравнений состояния вещества и других необходимых теплофизических данных. Для разработки данного кода применялись вычислительные методики на основе эйлеровых сеток нерегулярной структуры.

Создание кода MARPLE было коллективным проектом, выполненным авторами настоящего доклада методами объектно-ориентированного программирования на языке C++. Данный проект появился в результате анализа опыта эксплуатации МГД-кода РАЗРЯД [1], созданного около 20 лет назад в том же коллективе по принятой тогда «процедурной» технологии программирования. Проект кода включает традиционные разделы — построение сеточных аппроксимаций для уравнений исходной математической модели, разработку алгоритмов решения сеточных уравнений, разработку структур расчетных данных наряду со средствами их ввода и подготовки, включая генерацию сеток и их оснащение соответствующей задачей информацией. Таким образом, данная работа по сути является мультидисциплинарной.

Опыт создания и апробации MARPLE показал, что объектно-ориентированное программирование может стать эффективным инструментом, как на этапе коллективной разработки кода, так и на этапе его эксплуатации в коллективных исследовательских проектах. Четкая структурированность и иерархия конструкций C++ способствует улучшению архитектуры программного обеспечения, повышает удобочитаемость кода. Объектно-ориентированное программирование существенно облегчает возможность создания и использования программных модификаций. Это особенно важно для кодов, создаваемых в исследовательских целях, поскольку они гораздо чаще промышленных кодов подвергаются модификациям, как на уровне моделей, так и вычислительных алгоритмов.

#### *Литература:*

1. Гасилов В. А., Чуватин А. С. и др. Комплекс программ «РАЗРЯД»: моделирование

ускорения плазмы в сильноточных импульсных системах // Математическое моделирование, 2003. Т. 15. №9. С. 107–124.

2. Gasilov V. A., Chuvatin A. S., D'yachenko S. V., Olkhovskaya O. G., Kartasheva E. L., Boldarev A. S., Oreshkin V. I. MAPRLE simulations of the plasma MFC scheme. Известия высших учебных заведений, «Физика», 2006. Т. 49. №11. С. 189–192.

#### АЛГОРИТМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ СИГНАЛ-ШУМ ПРИ ОБРАБОТКЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

С. В. ГАСИЛОВ, ИММ РАН, МОСКВА

В настоящее время детекторы на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) повсеместно используются в спектроскопических приложениях благодаря их высокой чувствительности и низкому уровню шума. В большинстве исследований единственным источником помех, регистрируемых ПЗС детектором, является космический фон. Однако в экспериментах по регистрации сигнала, излучаемого фемтосекундной лазерной плазмой, ПЗС детектор подвержен значительно большему количеству помех, обусловленных различными высокоэнергетичными частицами, источником которых является сама плазма. На спектре в пикселе, где была зарегистрирована паразитная частица, появляется положительный выброс (пик). При больших значениях мощности лазерного пучка шумы из плазмы становятся преобладающими, количество пиков резко увеличивается, они начинают перекрываться, а их интенсивность может меняться в широком диапазоне значений. Такие пики очень сложно отличить от резких спектральных особенностей, что делает сложным, а иногда и невозможным, очистку спектров с помощью простых математических методов [1,2].

В данной работе предложен практический алгоритм, позволяющий эффективно обнаруживать и удалять пики. Метод основан на анализе нескольких записанных спектров,

что позволяет очень хорошо обнаруживать паразитные пики любой ширины. Рассмотрены условия проведения эксперимента, позволяющие наиболее эффективно очищать спектры. Алгоритм был протестирован на серии синтетических спектров и применен для анализа реальных спектров многозарядных ионов железа, тефлона, меди и алюминия, полученных в экспериментах по изучению взаимодействия сфокусированных фемтосекундных импульсов (длительностью 60 фс и мощностью до  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) с твердотельными мишенями.

*Литература:*

1. Hill W., Rogalla D. Anal. Chem. 1992. V. 64. P. 2575.
2. Zhang D., Jallad K. N., and Ben-Amotz D. Appl. Spectrosc. 2001. V. 55. P. 1523.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЧАЛА  
СПИНОДАЛЬНОГО РАСПАДА ПЕРЕГРЕТОЙ  
ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НЕПРЕРЫВНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ

М. М. ДЕМИН, МОСКОВСКИЙ ГУМАНИТАРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ,  
А. А. САМОХИН, ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
ИМ. А. М. ПРОХОРОВА РАН,  
В. И. МАЖУКИН, ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, Г. МОСКВА

Исследуется возможность применения разностных численных методов для решения задачи спинодального распада, в которой используется неустойчивая ветвь уравнения состояния (Ван-дер-Ваальса). В рамках данного подхода начальный этап фазового превращения оказывается близким к изотермическому. При этом максимальная величина взрывного скачка давления слабо зависит от параметров расчетной сетки, в отличие от общей пространственно-временной картины этого процесса.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №07-07-00045; проект №06-07-89191).*

OPTICAL DIAGNOSTICS IN LASER ASSISTED  
RAPID MANUFACTURING

M. DOUBENSKAIA, ECOLE NATIONALE  
D'INGENIEURS DE SAINT-ETIENNE,  
DIPI LABORATORY, FRANCE

Absence of on-line control in laser assisted Rapid Manufacturing is one of the main obstacles on the way of its industrial implementation. Application of optical diagnostics for the process of: (a) Direct Laser Manufacturing (DLM) with co-axial powder injection and (b) Selective Laser Melting (SLM) are presented in the paper. Velocity and size distribution of in-flight particles are measured by a CCD-camera based diagnostic tool, and temperature in the laser action zone is measured by pyrometers and infra-red camera.

Optical methods are used also for particle size distribution and particle shape control in powder blends applied in both technologies.

DLM with coaxial powder injection (TRUMPF installations: DMD with 5 kW CO<sub>2</sub> laser and LASM A with 2 kW Nd:YAG laser) was applied for fabrication of 3D objects from metallic powder. The complexity of the process and the actual requirements for the properties of the manufactured object, impose application of on-line monitoring and process control. Application of temperature control has certain advantages in comparison to the rest ones.

When using multi-component powder blends, for example, metal matrix composite with ceramic reinforcement, one needs to control temperature of the melt to avoid thermal decomposition of certain compounds and to assure melting of the base metal, to avoid useless overheating and to prevent formation of residual porosity.

The method of non-contact temperature measurements by a pyrometer is rather promising for on-line monitoring and control in DLM. However the proper application of pyrometry requires the solution of a number of methodological difficulties. The innovation of the present approach is the application of specially developed «notch» filters together with an

originally developed multi-wavelength pyrometer. As a result, melting-solidification dynamics, i.e. the instant when melting starts, the melt life-time and the solidification stage can be analyzed using reliable data on true temperature.

Additional problem in optical monitoring of DLM with coaxial powder injection is the particle-in-flight monitoring. It is necessary to control the particles jet geometry and its position relatively to the laser beam and the substrate, stability of the particles flux, their velocity and temperature, the latter one being the most difficult. The optical monitoring is used to optimize the conditions of particle injection in particular when powders with different particle size, geometry and density are injected simultaneously.

Optical diagnostics in Selective Laser Melting (PHENIX PM 100 machine) is used to visualize the laser beam / powder bed interaction and to measure the brightness temperature in the zone of powder melting. Infra red FLIR camera as well as pyrometers is applied.

#### OPTICAL PROPERTIES OF METALS WITH HOT ELECTRONS

V. A. ISAKOV, A. P. KANAVIN,  
S. A. URYUPIN, P. N. LEBEDEV  
PHYSICAL INSTITUTE, RUSSIAN ACADEMY  
OF SCIENCES, MOSCOW

An approach to description of femtosecond laser pulse absorption by metals under the conditions of high-frequency skin effect is proposed. It is shown that measurements of absorption or reflection coefficients can provide the determining of effective frequencies of electron-electron umklapp collisions.

According to modern understanding, optical properties of metals with comparable electron and lattice temperatures are mainly determined by electron-phonon collisions (Fisher et al., 2001; Yoneda et al., 2003). Qualitatively different absorption and reflection laws arise in the case of comparatively high-power femtosecond laser pulses. Under the action of such pulses,

fast heating of electrons becomes possible and during the time shorter than that of the electron-lattice energy exchange the state of the metal is nonequilibrium with effective electron thermal energy higher than the lattice one but lower than the Fermi energy. In the nonequilibrium state, the effective frequency of electron-electron collisions can be much higher than that of electron-phonon collisions. Therefore, studies of optical properties of metals under new conditions of dominant electron-electron umklapp collisions become actual. In the report we present the theoretical results on the absorption coefficient of a metal with hot electrons.

#### ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ИМПЕДАНСНОЙ ГРАНИЦЫ МЕТАЛЛА

А. Ю. ИВОЧКИН, А. А. КАРАБУТОВ,  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ЦЕНТР  
МГУ ИМ. М. В. ЛОМОНОСОВА,  
А. Г. КАПТИЛЬНЫЙ, ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ОИВТ РАН, МОСКВА

Представлены результаты исследований высокоэнергетических состояний и фазовых переходов на примере свинца при воздействии наносекундного лазерного импульса в широком диапазоне интенсивностей. Для реализации условий высокоэффективной генерации давления при сохранении локального термодинамического равновесия облучаемая поверхность металла была механически зажата пластиной прозрачного диэлектрика [1,2]. Сравнимость механических импедансов прозрачного слоя и мишени создает условия, позволяющие достигать высоких уровней давления (до ~100 кбар) при сравнительно низких уровнях энергии лазерного импульса (~1 Дж). Наносекундная длительность лазерного импульса позволяет при этом получать высокие температуры (вплоть до 10 кК и выше) поверхностного слоя мишени (порядка микрон), сохраняя ее объем холодным.

Мишень представляет собой плоскопараллельную сборку из двух кварцевых пластин, между которыми заливается исследуемый металл толщиной 150–300 мкм. С тыльной стороны мишени присоединяется датчик давления — широкополосный пьезоприемник на основе ниобата лития с полосой не менее 100 МГц (время нарастания — менее 3 нс). Греющий лазерный импульс направляется на поверхность мишени под углом  $45^\circ$ , скоростные фотодиоды регистрируют форму падающего и отраженного от поверхности металла пучков. Тепловое излучение нагреваемой поверхности металла (по направлению нормали к мишени) собирается оптической системой и через волокно и систему фильтров подается на скоростной фотоприемник (время нарастания — 0.8 нс). Электронная система регистрирует одновременно (за один импульс) четыре сигнала: падающий и отраженный лазерный импульсы, акустический сигнал и тепловое излучение. Рассогласование взаимной привязки сигналов по времени не превышает 0.5 нс.

Динамика термодинамического состояния металла анализируется по форме и амплитуде импульса давления, распространяющегося от нагреваемой поверхности и по изменению отражательной способности облучаемой поверхности металла.

Измерения импульса давления позволили зарегистрировать фазовые переходы в свинце: плавление и кипение на облучаемых поверхностях образцов при давлении до  $P_{\max} \approx 0.1$  ГПа. Показано, что до плавления амплитуда давления пропорциональна текущей интенсивности лазерного излучения, а при переходе через порог плавления — пропорциональна величине поглощенной энергии лазерного импульса. Момент времени, когда начинается «деформация» переднего фронта импульса давления, определяет начало плавления. При реализации высокоэнергетических состояний с фазовыми переходами в тонком приповерхностном слое металла плотность существенно падает, что приводит к значительному снижению, как отражательной способности, так и электропроводности.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №05-08-50348-а).*

#### *Литература*

1. Карабутов А. А., Кубышкин А. П., Панченко В. Я., Подымова Н. Б. Динамический сдвиг точки кипения металлов при лазерном воздействии // Кв. электр., 22(8). С. 820–824, 1995.

2. Карабутов А. А., Капильный А. Г., Кубышкин А. П. Исследование плавления индия и углерода методом динамического лазерного воздействия // Изв. РАН, сер. физическая, 63(10). С. 1934–1942, 1999.

#### АБЛИРОВАННЫЕ НАНОЧАСТИЦЫ В ВОЗДУХЕ И ИХ РОЛЬ В ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МИКРООБРАБОТКЕ

S. M. KLIMENTOV, P. A. PIVOVAROV,  
V. I. KONOV, S. V. GARNOV,  
GENERAL PHYSICS INSTITUTE OF THE RUSSIAN  
ACADEMY OF SCIENCES, MOSCOW  
F. DAUSINGER, UNIVERSITY OF STUTTGART,  
GERMANY

Данная работа представляет собой результат сотрудничества нескольких групп из GPI, NSC GPI и Штутгартского университета.

Исследуется один из основных вопросов, относящихся к лазерному аблирующему воздействию. А именно: что случается с материалом, который только что удален таким образом с поверхности или из глубокого кратера.

Обычно полагают, что он просто удален, перенесен на значительное отдаление и никак не влияет на действие последующих лазерных импульсов. В данной работе показано, что это не совсем так. Аблированный материал долгое время остается поблизости, образуя облако частиц субмикронного размера и такое облако может значительно повлиять на абляцию при повторном облучении. Сделана попытка характеризовать эти

частицы, а также предложено несколько способов их устранения.

EXPERIMENTAL STUDIES AND SIMULATIONS  
OF ULTRAFAST DYNAMICS OF SUPERCRITICAL  
SURFACE PLASMA GENERATED  
BY FEMTOSECOND LASER PULSES

S. I. KUDRYASHOV, V. D. ZVORYKIN, A. A. IONIN, P.  
N. LEBEDEV PHYSICAL INSTITUTE,  
A. JOGLEKAR, UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA  
AT CHAPEL HILL, USA  
G. MOUROU, LABORATOIRE D'OPTIQUE  
APPLIQUEE, ENSTA — ECOLE POLYTECHNIQUE,  
FRANCE  
A. J. HUNT, CENTER FOR ULTRAFAST SCIENCE,  
UNIVERSITY OF MICHIGAN, USA

Optical damage produced by femto-second (fs) pulsed lasers on dielectric surfaces is extremely precise, allowing the damage mechanisms to be inferred from reproducible damage characteristics. Nano-scale fs laser ablation is applied to probe the ultra-fast dynamics of laser energy deposition including the generation and transport of supercritical surface electron-hole or electron-ion plasmas. For surface nano-craters fabricated on quartz and glass surfaces by single fs laser shots above certain well-defined laser intensity thresholds, the scaling between size and incident laser intensity reveals multi-photon absorption and ambipolar carrier diffusion to be the dominant fundamental processes governing dynamics of the dense electron-hole plasma. These dependences enable direct estimation of important ionization parameters such as plasma densities and multi-photon absorption cross sections consistent with known values for dielectrics with similar bandgaps. As the intensity approaches another higher, second threshold value, multi-photon ionization of the dielectrics produces warm, strongly ionized surface electron-ion plasma, leading to deep surface nano-holes via additional ablation by radiative energy transfer in the form of highly penetrating short-wavelength radiation from the surface plasma into the bulk material.

NANOSECOND LASER PLASMA-ASSISTED DEEP  
DRILLING OF OPAQUE AND TRANSPARENT  
SOLIDS

STANLEY PAUL, SERGEY I. KUDRYASHOV, KEVIN  
LYON, SUSAN D. ALLEN  
DEPARTMENT OF PHYSICS, ARKANSAS STATE  
UNIVERSITY, USA,  
P. N. LEBEDEV PHYSICAL INSTITUTE, MOSCOW

A new mechanism of ultra-deep (up to tens of microns per pulse, sub-mm total hole depths) plasma-assisted ablative drilling of optically opaque and transparent materials by high-power nanosecond lasers has been proposed and verified experimentally using optical transmission and contact photo-acoustic techniques to measure average drilling rates per laser shot versus laser intensity at constant focusing conditions. The plots of such experimental relationships exhibit slopes with magnitudes in good agreement with those ones predicted by the proposed model or demonstrated in other experimental studies. We assume that the ultra-deep drilling mechanism consists of a number of stages, including laser-induced generation of hot ablative near-surface plasma, ultra-deep «non-thermal» energy delivery into bulk solids by the short-wavelength Bremsstrahlung plasma radiation, their bulk heating and melting, accompanied by subsurface boiling in the melt pool and resulting melt expulsion from the target.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

А. В. МАЖУКИН,  
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА

При пико- и фемтосекундном воздействии лазерного излучения возможен разогрев электронной подсистемы до высокой, порядка десятков эВ, температуры. Состоянием электронной подсистемы определяются значения двух важнейших характеристик: коэффициента поглощения и коэффициента отражения.

Процесс распространения электромагнитных волн в твердом теле можно определить двумя величинами: диэлектрической проницаемостью и электропроводностью.

Поглощательная способность поверхности раздела  $A$  [%] и коэффициент поглощения  $\alpha$  [см<sup>-1</sup>] для полубесконечной среды можно выразить через действительную  $p$  и комплексную часть  $k$  диэлектрической проницаемости.

Определение действительной части диэлектрической проницаемости в аналитическом виде возможно лишь для двух предельных случаев: для высоких частот и низких частот.

Высокочастотное и низкочастотное приближение описываются выражениями, зависящими от частоты излучения и температуры среды. При фиксированной частоте их можно использовать для построения температурных зависимостей в области низких и высоких температур. Промежуточное значение можно определить с помощью интерполяционной процедуры.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №07-07-00045; проект №06-07-89191).*

#### ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

А. В. МАЖУКИН,  
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА

Использование лазеров с очень короткой ( $\tau=10$ - $12$ - $10$ - $15$  с) длительностью и очень высокой интенсивностью ( $G=10^{12}$ - $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>) приводит к появлению набора новых эффектов, связанных с фотопроцессами.

Эмиссионные явления с облучаемой лазерным излучением твердотельной поверхности основываются на трех основных механизмах: фотоэлектрическом, туннельном и термоэлектронном эффектах. Для выхода электронов из твердого тела в вакуум им нужно сообщить энергию для преодоления потенциального барьера на границе твердое тело — вакуум (работа выхода  $\phi$ ).

Согласно квантовой теории фотоэффекта фотоны проникают в вещество и передают свою энергию электронам. Часть полученной энергии электроны расходуют на совершение работы выхода, а остальная трансформируется в кинетическую энергию вылетающих электронов. Энергетический баланс описывается уравнением Эйнштейна.

Если энергия одного или нескольких поглощенных фотонов превышает энергию потенциального барьера, то фотоэффект становится доминирующим механизмом эмиссии. Если энергия коллективизированных электронов окажется меньше энергии потенциального барьера, эмиссия может произойти вследствие туннельного просачивания электронов через барьер из коллективизированного в свободное состояние (так называемый туннельный эффект). В случае, когда электроны поверхностного слоя имеют кинетическую энергию, достаточную для преодоления энергии поверхностного барьера, термоэлектронная эмиссия становится доминирующим механизмом.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №07-07-00045; проект №06-07-89191).*

#### ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОЛИТИКИ В ОБЛАСТИ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

А. В. МАРТЫНЕНКО, НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА  
НАУКИ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЕПАРТАМЕНТА  
ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ВЫСОКИХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ЗАВЕДУЮЩИЙ КАФЕДРОЙ  
СОЦИАЛЬНОЙ МЕДИЦИНЫ МосГУ

Процесс научно-технологического развития общества вышел на новый виток, связанный с созданием и все более активным использованием нанотехнологий в инженерии, энергетике, электронике, машиностроении, авиакосмической технике, информатике, молекулярной биологии, генетике, медицине, сельском хозяйстве и др.

Для развития nanoиндустрии необходима современная кадровая, приборно-инструментальная, технологическая и информационная базы, эффективная координация работ в этой области.

На основе современного уровня разработок и перспектив развития фундаментальных исследований в настоящее время реализуются следующие направления государственной политики в области развития нанотехнологий.

**Первое.** Кардинальное увеличение объемов производства востребованной продукции нанотехнологий, насыщение соответствующих рынков в ближайшие годы.

**Второе.** Разработка и доведение до промышленного производства новых видов продукции нанотехнологий, которые должны появиться на рынке через 3–5 лет.

**Третье.** Опережающее развитие принципиально новых направлений в области нанотехнологий, обеспечивающих создание в стране надотраслевой научно-образовательной и производственной среды в перспективе на ближайшие 10–20 лет.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ GDT/SVR ДЛЯ СТОРОННИХ СОЛВЕРОВ И ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

А. МЕДВЕДЕВ, GDT SOFTWARE GROUP, ТУЛА

В данный момент компания GDT Software Group ведет работу по созданию универсальной схемы, позволяющей включать в код пакета реализации численных схем (солверов), подготовленных пользователями пакета. Солвер, встроенный внутрь пакета GasDynamicsTool по этой схеме, получит возможность использования всех функций пакета, начиная с интерактивной системы ввода начальных и граничных условий, заканчивая интеграцией с современной системой визуализации данных Scientific-VR, включая возможность визуализации on-the-fly. Интегрированный таким образом код получит возможность выполняться на парал-

лельных вычислительных системах разной архитектуры.

Доклад сообщает о ходе работы по созданию этой универсальной схемы и дает представление о возможностях последних версий пакетов GasDynamicsTool и Scientific-VR.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ В ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

М. Е. ПОВАРНИЦЫН, К. В. ХИЩЕНКО,  
П. Р. ЛЕВАШОВ, ИТЭС ОИВТ РАН, Г. МОСКВА  
Т. Е. ИТИНА, MARSEILLE, FRANCE

Исследуется взаимодействие коротких лазерных импульсов ( $\tau = 100$  фс,  $\lambda = 0.8$  мкм) с металлическими мишенями в вакууме при интенсивности излучения в диапазоне от  $10^{12}$  до  $5 \times 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Для описания процессов поглощения лазерной энергии и последующей релаксации вещества нами разработана двухтемпературная модель, объединяющая в себе несколько численных подходов. Модель согласованным образом описывает гидродинамическое течение двухтемпературной плазмы, поглощение энергии лазерного излучения, электрон-фононные/ионные столкновения и электронную теплопроводность. Фазовые переходы в нашей модели учитываются с помощью двухтемпературного широкодиапазонного многофазного уравнения состояния в табличной форме. В основе численного алгоритма лежит схема Годунова высокого порядка точности на Эйлеровой сетке. Кроме того, разработанный подход включает в себя алгоритм выделения контактных и свободных поверхностей, описывает кинетику декомпозиции метастабильного вещества вблизи спинодали, и содержит алгоритм фрагментации при растягивающих напряжениях и отрицательных давлениях. В работе проведено моделирование взаимодействия одиночных лазерных импульсов с металлическими мишенями. Результаты расчетов согласуются количественно с данными лабора-

торных экспериментов для металлов с различными скоростями электрон-ионных столкновений (Au и Al). В работе исследовались эволюция зоны плавления, распространение ударной волны по образцу, возникновение фрагментации вблизи поверхности мишени. В численном эксперименте наблюдаются три механизма абляции вещества мишени: (1) абляция испарением поверхностного слоя, (2) распад метастабильного жидкого состояния в окрестности критической точки и (3) фрагментация жидкой фазы под действием растягивающих напряжений. Установлено, что основная доля аблированного вещества (около 80%) приходится на механизм (3), а на абляцию испарением (2) около 10–15%. Таким образом, учет всех трех механизмов позволяет правильно оценить глубину получаемого кратера, в соответствии с экспериментальными данными.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

О. Д. УСТЮГОВ, В. И. МАЖУКИН,  
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА

С. Д. УСТЮГОВ, ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ  
МАТЕМАТИКИ ИМ. М. В. КЕДЫША РАН, МОСКВА

Проведено двумерное численное МГД моделирование разлета плазмы во внешнем однородном магнитном поле в результате воздействия короткого импульса лазерного излучения. Расчеты осуществлены в цилиндрической системе координат на неоднородной сетке в каждом направлении. При моделировании была использована консервативная схема Годуновского типа со вторым порядком по пространству и времени. В результате моделирования показано, что магнитное поле изменяет пространственную структуру плазменного факела и вынуждает вещество двигаться ближе к оси симметрии.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №07-07-00045; проект №06-07-89191).*

#### MATHEMATICAL MODELLING OF PHASE TRANSITIONS WITH EXPLICIT TRACKING OF INTERFACES

V. MAZHUKIN,  
INSTITUTE OF MATHEMATICAL MODELING,  
RAS, MOSCOW,  
M. CHUIKO, A. LAPANIK,  
INSTITUTE OF MATHEMATICS,  
NASB, MINSK

Application of the dynamic adaptation method for the numerical solution of multidimensional axisymmetric Stefan problems with explicit tracking of interfaces is presented. The dynamic adaptation method is based on the idea of transition of the physical coordinate system to the non-stationary coordinate system. The results of computational experiments for modelling the action of high energy fluxes on metals are given.

**Key words:** Stefan problem, curvilinear coordinate systems, adaptive method, melting, evaporation, difference scheme.

Now-days laser technology is the widespread tool for the treatment of metals, dielectrics and semiconductors. Melting and evaporation are the basis of such technological operations as welding, drilling, surface modification and etc. In pulsed-laser material processing the phase transitions occur at very high rates. In this case a non-equilibrium phase-change kinetics becomes important [1]. One of the key techniques in study of laser influence on materials is mathematical modelling [2]. Mathematical description of such processes leads to the moving free-boundary problems for the heat diffusion [3]. Two approaches are widely used for numerical solution of the Stefan type problems: explicit tracking of moving interfaces [4; 5] and using smoothing procedures [6; 7; 8; 9]. Dominant position of smoothing procedures in multidimensional problems is considerably connected with absence of effective methods for explicit tracking of moving interfaces. The smoothing algorithms don't allow for such physical effects as kinetics of phase transitions. In the problem of the pulsed action of high-

energy fluxes on materials, where the nonequilibrium of fast phase transformations play a dominant role, it is necessary to locate explicitly the phase interfaces and take into account the related processes.

In present work the adaptive algorithm for solution of classical version of three-dimensional axisymmetric Stefan problem with explicit tracking of phase interfaces is considered. Two-interface Stefan problem in arbitrary two-dimensional regions was solved by the dynamic adaptation method [10;11]. This method is based on transformation of the initial coordinate system to the nonstationary curvilinear coordinate system. In this nonstationary boundary fitted coordinate system the interfaces coincide with the coordinate lines. In this case it is necessary to determine not only the value of the unknown functions (temperature fields) but also the coordinates of the grid points. The movement of the grid points is described by the partial differential equations added to the definition of problem.

### References

1. G.-X. Wang and V. Prasad. Microscale heat and mass transfer and non-equilibrium phase change in rapid solidification. *Materials Science and Engineering*, 292, 142–148, 2000.
2. V. Mazhukin and A. Samarskii. Mathematical modelling in the technology of laser treatments of material. *Surv. Math. Ind.*, 4, 85–149, 1994.
3. D. A. Tarzia. A bibliography on FBP. The Stefan problem. *MAT-Serie A*, 1,1–299, 2000.
4. P. V. Breslavskii and V. I. Mazhukin. Mathematical modeling of pulse fluxing and evaporation processes of metal with explicit interface tracking. *Inzh. Fiz. Journal*, 57(1), 107–114, 1989. (in Russian)
5. M. Davis, P. Kapadia and J. Dowden. Solution of a Stefan problem in the theory of laser welding by the method of lines. *J. Comput. Phys*, 60, 534–548, 1985.
6. G. H. Meyer. The numerical solution of Stefan problems with front-tracking and smoothing methods. *Appl. Math. Comput*, 4, 283–306, 1978.

7. A. A. Samarskii and B.D. Moiseenko. Effective homogeneous scheme for multidimensional Stefan problem. *J. Vychisl. Matem. i Matem. Fiz*, 5(5), 816–827, 1965 (in Russian).

8. V. R. Voller, C. R. Swaminathan and B. G. Tomas. Fixed grid techniques for phase change problems: a review. *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 30, 875–898, 1990.

9. B. R. E. White. A modified finite difference scheme for the Stefan problem. *Math. Comput.*, 41, 816–827, 1983.

10. V. Mazhukin and M. Chuiko. Solution of the multi-interface Stefan problem by the method of dynamic adaptation. *Comput. Meth. Appl. Math.*, 2, 283–294, 2002.

11. V. I. Mazhukin, A. A. Samarskii and M. M. Chuiko. Dynamic adaptation method for non-stationary multidimensional Stefan problems. *Doklady RAS*, 368(3), 307–310, 1999 (in Russian).

### DYNAMIC ADAPTATION METHOD FOR THE SOLUTION OF 2-D STEFAN PROBLEM

M. G. ЛОВОК, ИНСТИТУТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАН, МОСКВА,  
M. M. CHUIKO, INSTITUTE OF MATHEMATICS,  
NASB, MINSK,  
O. N. KOROLEVA, МосГУ

We describe method for the solution of Stephan type problems using interphase front tracking. The numerical algorithm is based on the method of dynamic adaptation of computation grids for solution to be determined. In the dynamic adaptation methods the problem for computational grid construction is formulated at a differential level. In the differential problem, one part of equations describes physical processes, and another part describes the behavior of grid points. Method allows us to spend less computational time and using lesser number of grid cells. The numerical modeling of laser interaction, between laser and superconducting ceramics using one dimensional

model[1], shows that there is an overheating in solid and liquid phases; similar modeling for laser-metals interaction with two-dimensional model[2] is made in order to present potentials of the method in solving problems with complex geometry.

[1] V. Mazhukin, I. Smurov, C. Dupuy, D. Jeandel, Simulation of laser melting and evaporation of superconducting ceramics, Numerical Heat Transfer, Part A, 26:587–600, 1994 [2] V. I. Mazhukin, M. M. Chuiko, A. M. Lapanik Dynamic adaptation method for the numerical solution of multi-dimensional axisymmetric Stefan problems, Mathematical Modeling and Analysis, 2003. Vol. 8, № 4, P. 303–314

*Growth type projects RFBR №07-07-00045; №06-07-89191.*

DYNAMIC ADAPTATION METHOD  
FOR NUMERICAL SOLUTION  
OF AXISYMMETRIC STEFAN  
PROBLEMS

V. I. MAZHUKIN,  
INSTITUTE OF MATHEMATICAL MODELLING,  
RAS, MOSCOW  
M. M. CHUIKO,  
INSTITUTE OF MATHEMATICS,  
NAS OF BELARUS  
A. M. LAPANIK, BELARUSSIAN STATE UNIVERSITY,  
MINSK, BELARUS

Application of the dynamic adaptation method for the numerical solution of multidimensional axisymmetric Stefan problems with explicit tracking of interfaces is presented. The dynamic adaptation method is based on the idea of transition of the physical coordinate system to the non-stationary coordinate system. The results of computational experiments for modelling the action of high energy fluxes on metals are given.

Key words: Stefan problem, curvilinear coordinate systems, adaptive method, melting, evaporation, difference scheme.

О НЕКОТОРЫХ ВАРИАНТАХ МЕТОДОВ  
СОПРЯЖЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ

Л. Ф. ЮХНО, ИММ РАН

Предлагается и исследуется модификация некоторых известных методов типа сопряженных направлений для решения системы линейных алгебраических уравнений и для решения задачи исключения (задачи вычисления значения линейного функционала от решения без вычисления самого решения). При точной реализации вычислений модифицированные и исходные методы совпадают на каждом шаге, однако предлагаемые модификации более устойчивы относительно накопления погрешностей арифметических операций. Показано, что функционал ошибки для этих методов гарантированно убывает на каждой итерации, в то время как для исходных методов в результате накопления погрешностей функционал ошибки может возрасти, что может привести к «разбалтыванию» метода. Это позволяет применять предложенные модификации к решению плохо обусловленных и некорректных задач.

Приводятся результаты численных экспериментов, подтверждающие эффективность этих модификаций.

*Литература*

1. Фаддеев Д. К., Фаддеева В. Н. Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз, 1960.
2. Абрамов А. А., Юхно Л. Ф. Один метод исключения для линейных задач // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1998. Т. 38. №4. С. 547–556.
3. Павлов А. С., Юхно Л. Ф. О решении плохо обусловленных систем итерационными методами // Матем. моделирование. 2004. Т. 16. №7. С. 13–20.
4. Юхно Л. Ф. Об одной модификации методов типа сопряженных направлений // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2006. Т. 46. №1. С. 7–11.

Материалы подготовил  
В. И. МАЖУКИН