

Форма «Т». Титульный лист заявки в Российский научный фонд  
Конкурс 2022 года «Проведение фундаментальных научных исследований и  
поисковых научных исследований отдельными научными группами»

Название проекта <b>Численное моделирование ударно-волновых процессов в металлах, индуцированных фемтосекундным лазерным излучением</b>		Номер проекта <div style="text-align: center; font-weight: bold; font-size: 1.2em;">22-11-00294</div> <div style="text-align: center;">  </div>	
		Код типа проекта: <b>ОНГ(2022)</b>	
		Отрасль знания: <b>01</b>	
		Основной код классификатора: <b>01-113</b> Дополнительные коды классификатора: <b>01-217 01-218</b>	
		Код ГРНТИ <b>27.35.36</b>	
Фамилия, имя, отчество (при наличии) руководителя проекта: <b>Шепелев Вадим Владимирович</b>		Контактные телефон и e-mail руководителя проекта: <b>+79057073586, vadim.aries@gmail.com</b>	
Полное и сокращенное наименование организации, через которую должно осуществляться финансирование проекта: <b>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук</b> <b>ИАП РАН</b>			
Объем финансирования проекта в 2022 г. <b>7000</b> тыс. руб.		Год начала проекта: <b>2022</b>	Год окончания проекта: <b>2024</b>
Фамилии, имена, отчества (при наличии) основных исполнителей (полностью)	<div style="margin-bottom: 5px;"><b>Жаховский Василий Викторович</b></div> <div style="margin-bottom: 5px;"><b>Ильницкий Денис Константинович</b></div> <div style="margin-bottom: 5px;"><b>Хохлов Виктор Александрович</b></div> <div style="margin-top: 5px;"><i>(руководитель проекта в данной графе не указывается)</i></div>		
Гарантирую, что при подготовке заявки не были нарушены авторские и иные права третьих лиц и/или имеется согласие правообладателей на представление в Фонд материалов и их использование Фондом для проведения экспертизы и для обнародования (в виде аннотаций заявок).			
Подпись руководителя проекта  _____ /В.В. Шепелев/		Дата регистрации заявки <b>10.11.2021 г.</b>	
Подпись руководителя организации* <small>* Либо уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа. В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки <u>прилагается копия распорядительного документа или доверенности</u>, заверенная печатью организации. Непредставление копии распорядительного документа или доверенности в случае подписания формы уполномоченным представителем организации, а также отсутствие расшифровки подписи, является основанием недопуска заявки к конкурсу.</small>			
_____ / _____ /			
		Печать (при наличии) организации	

# Форма 1. Сведения о проекте

## 1.1. Название проекта

*на русском языке*

Численное моделирование ударно-волновых процессов в металлах, индуцированных фемтосекундным лазерным излучением

*на английском языке*

Numerical simulation of shock-wave processes in metals induced by femtosecond laser radiation

## 1.2. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, критическая технология

Указывается согласно перечню (Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 года №899) в случае, если тематика проекта может быть отнесена к одному из приоритетных направлений, а также может внести вклад в развитие критических технологий Российской Федерации.

3. Информационно-телекоммуникационные системы.

18. Технологии и программное обеспечение распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем.

**Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации») (при возможности отнесения)**

H1 Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта

## 1.3. Ключевые слова (приводится не более 15 терминов)

*на русском языке*

Ударные волны, фемтосекундные лазеры, гидродинамическое моделирование, молекулярно-динамическое моделирование, уравнения состояния

*на английском языке*

Shock waves, femtosecond lasers, hydrodynamic modeling, molecular-dynamic modeling, equations of state

## 1.4. Аннотация проекта (объемом не более 2 стр.; в том числе кратко – актуальность решения указанной выше научной проблемы и научная новизна)

Данная информация может быть опубликована на сайте Фонда в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

*на русском языке*

Целью проекта является разработка отечественного пакета программ Laser Problem Solver (LPS) для моделирования многомерных задач взаимодействия лазерного излучения с веществом. Программный пакет Laser Problem Solver (LPS) предназначен для решения систем дифференциальных уравнений гидродинамики гиперболического типа и уравнений движения в молекулярной динамике на многопроцессорных вычислительных системах. Особый интерес представляет исследование пространственных эффектов распространения индуцированных фемтосекундным лазерным нагревом ударных волн в сплошных металлических мишенях и тонких пленках. Эти вопросы рассматриваются с точки зрения влияния на структуру и прочностные характеристики металла в нанометровых субмикронных масштабах. Возможности пакета программ продемонстрированы на нескольких важных прикладных задачах лазерного облучения:

(А) Задача об исследовании механизма образования больших отверстий в тонкой металлической пленке под действием индуцированной фемтосекундным лазером ударной волны.

(В) Задача о численном исследовании наблюдающихся в экспериментах явлений лазерного ударного упрочнения подповерхностного слоя сплошной металлической мишени.

(С) Задача об исследовании плавления и ударного сжатия порошков с помощью лазеров.

(D) Задача об абляции металлической мишени структурированным лазерным пучком, также иногда называемым вихревым пучком.

Рассматриваемые задачи имеют важное применение в технологиях лазерного ударного упрочнения, плазмонике, микро- и нанoeлектронике, технологиях 3D-печати, метаповерхностях и в других высокотехнических областях.

Преимуществом пакета является возможность согласованного применения дополняющих друг друга континуального

гидродинамического и дискретного атомистического подходов к моделированию для одной и той же физической задачи. Также важной особенностью является использование уравнений состояния вещества и потенциалов межатомного взаимодействия для широкого спектра металлов.

Научная новизна проекта определяется тем, что в ходе его реализации будет дано объяснение новым открытым в последние десятилетия эффектам действия индуцированных лазером ударных волн на металлы с использованием детального численного моделирования, основанного на потенциалах межатомного взаимодействия и реальных широкодиапазонных уравнениях состояния вещества.

#### *на английском языке*

The aim of the project is to develop a domestic software package Laser Problem Solver (LPS) for modeling multidimensional problems of interaction of laser radiation with matter. The Laser Problem Solver (LPS) software package is designed to solve systems of hyperbolic type b differential equations of hydrodynamics and equations of motion in molecular dynamics on multiprocessor computing systems. Of particular interest is the study of spatial effects of propagation of shock waves induced by femtosecond laser heating in solid metal targets and thin films. These issues are considered from the point of view of the impact on the structure and strength characteristics of the metal at nanometer submicron scales. The following tasks will be considered:

- (A) The problem of investigating the mechanism of formation of large holes in a thin metal film under the action of a femtosecond laser-induced shock wave.
- (B) The problem of numerical investigation of the phenomena of laser shock hardening of the subsurface layer of a solid metal target observed in experiments.
- (C) The problem of the study of melting and shock compression of powders using lasers.
- (D) The problem of ablation of a metal target by a vortex laser beam.

The problems under consideration have important applications in laser shock hardening technologies, plasmonics, micro- and nanoelectronics, 3D printing technologies, metasurfaces and other highly technical fields.

The advantage of the package is the possibility of a coordinated application of complementary continuous hydrodynamic and discrete atomistic approaches to modeling for the same physical problem. Another important feature is the use of equations of state of matter and interatomic interaction potentials for a wide range of metals.

The scientific novelty of the project is determined by the fact that in the course of its implementation, an explanation will be given for the effects of laser-induced shock waves on metals discovered in recent decades using detailed numerical modeling based on the potentials of interatomic interaction and real wide-range equations of state of matter.

### **1.5. Ожидаемые результаты и их значимость (указываются результаты, их научная и общественная значимость (соответствие предполагаемых результатов мировому уровню исследований, возможность практического использования ожидаемых результатов проекта в экономике и социальной сфере, в том числе для создания новой или усовершенствования производимой продукции (товаров, работ, услуг), создания новых или усовершенствования применяемых технологий))**

Данная информация может быть опубликована на сайте Фонда в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет».

#### *на русском языке*

В настоящее время существует достаточное количество программных продуктов, решающих задачи моделирования физических процессов в сплошных средах. К наиболее известным из этих пакетов, которые могут быть полезны для моделирования взаимодействия лазерного излучения с веществом, относятся такие пакеты, как ABAQUS, LS-DYNA, COMSOL, LAMMPS, Abinit, Elk, VASP. Отдельным трендом, касающимся современных лазерных расчетов, является использование атомистических подходов к моделированию с большим количеством частиц, особенно в случае коротких и ультракоротких импульсов. Эти методы позволяют выполнять детализированные симуляции, описывающие процессы практически на атомном уровне. В свою очередь, атомистические коды имеют собственные ограничения, связанные с большими требованиями к вычислительным ресурсам, а также не имеют в своем арсенале континуальных моделей.

В этой связи актуальным представляется использование гибридного подхода, который позволил бы использовать совместно преимущества и континуальной, и дискретной группы методов, усиливая тем самым оба подхода и давая возможность исследователю получить более детальную информацию о процессе.

Основными результатами проекта будут являться физико-математические модели, численные алгоритмы и пакет прикладных программ. В рамках проекта планируется численное решение следующих задач по взаимодействию лазерного излучения с веществом:

- (A) Исследования ударно-волнового механизма образования отверстий при облучении тонкой металлической пленки

фемтосекундным лазерным импульсом. Будут проведены расчеты в реальном диапазоне начальных вложенных энергий, получены эволюции профилей давления в пленке и подложке, оценены и сравнены с экспериментов размеры получающихся отверстий в зависимости от вложенной энергии.

(В) Задачи по распространению индуцированной фемтосекундным лазером ударной волны в сплошной металлической мишени, исследованию закона ее формирования и затухания в металле, ее влияния на упрочнение подповерхностного слоя металла. Будут оценены и сравнены с известными экспериментами размеры зоны упрочнения металла в зависимости от параметров импульса.

(С) Задача об ударном и плавящем воздействии на гранулированные среды лазерного излучения. Будут проведены расчеты по взаимодействию лазерного излучения на набор частиц микро- и наномасштаба, и анализ происходящих в них процессов плавления/рекристаллизации и ударного воздействия лазерного импульса.

(D) Задача об абляции металлической мишени структурированным лазерным пучком. Будет рассмотрено воздействие структурированных лазерных пучков на объемные и пленочные мишени и проведено численное исследование формирования наноструктур, сохраняющих на поверхности отпечаток хиральности световой волны, что является отличительной чертой структурированных пучков. Световое пятно в этом случае представляет собой кольцо, а не круг, в отличие от Гауссова пучка.

#### *на английском языке*

Currently, there are a sufficient number of software products that solve the problems of modeling physical processes in continuous media. The most well-known of these packages, which can be useful for modeling the interaction of laser radiation with matter, include such packages as ABAQUS, LS-DYNA, COMSOL, LAMMPS, Abinit, Elk, VASP. Those of them that work with

A separate trend concerning modern laser calculations is the use of atomistic approaches to modeling with a large number of particles, especially in the case of short and ultrashort pulses. These methods make it possible to perform detailed simulations describing processes almost at the atomic level. In turn, atomistic codes have their own limitations associated with high demands on computing resources, and also do not have continuum models in their arsenal.

In this regard, it seems relevant to use a hybrid approach that would allow using together the advantages of both a continuum and a discrete group of methods, thereby strengthening both approaches and enabling the researcher to obtain more detailed information about the process.

The main results of the project will be physical and mathematical models, numerical algorithms and a package of application programs. Within the framework of the project, it is planned to numerically solve the following problems on the interaction of laser radiation with matter:

(A) Studies of the shock-wave mechanism of hole formation during irradiation of a thin metal film by a femtosecond laser pulse. Calculations will be carried out in the real range of initial embedded energies, the evolutions of pressure profiles in the film and substrate will be obtained, the sizes of the resulting holes depending on the energy invested will be estimated and compared with experiments.

(B) Problems of propagation of a shock wave induced by a femtosecond laser in a solid metal target, investigation of the law of its formation and attenuation in metal, its effect on the hardening of the subsurface layer of metal. The dimensions of the metal hardening zone depending on the pulse parameters will be evaluated and compared with known experiments.

(C) The problem of impact and melting effects on granular media of laser radiation. Calculations will be carried out on the interaction of laser radiation on a set of micro- and nanoscale particles, and analysis of the melting/recrystallization processes occurring in them and the impact of the laser pulse.

(D) The problem of ablation of a metal target by a structured laser beam. The effect of structured laser beams on volumetric and film targets will be considered and a numerical study of the formation of nanostructures preserving the chirality imprint of the light wave on the surface, which is a distinctive feature of structured beams, will be carried out. The light spot in this case is a ring, not a circle, unlike a Gaussian beam.

#### **1.6. В состав научного коллектива будут входить (указывается планируемое количество исполнителей (с учетом руководителя проекта) в течение всего срока реализации проекта):**

Несоответствие состава научного коллектива (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) требованиям пункта 12 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

**8 исполнителей проекта (включая руководителя),**

В соответствии с требованиями пункта 12 конкурсной документации от 4 до 10 человек вне зависимости от того, в трудовых или гражданско-правовых отношениях исполнители состоят с организацией.

в том числе:

- 5 исполнителей в возрасте до 39 лет включительно;
- 1 аспирантов (адъюнктов, интернов, ординаторов) очной формы обучения;
- 0 студентов очной формы обучения.

**1.7. Планируемый состав научного коллектива с указанием фамилий, имен, отчеств (при наличии) членов коллектива, их возраста на момент подачи заявки, ученых степеней, должностей и основных мест работы, формы отношений с организацией (трудовой договор, гражданско-правовой договор) в период реализации проекта**

*на русском языке*

Шепелев Вадим Владимирович, 38 лет, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматизации проектирования РАН, трудовой договор - руководитель

Жаховский Василий Викторович, 58 лет, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Центр фундаментальных и прикладных исследований (ЦФПИ) ФГУП "ВНИИА", трудовой договор - основной исполнитель;

Хохлов Виктор Александрович, 69 лет, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, трудовой договор - основной исполнитель

Ильницкий Денис Константинович, кандидат физико-математических наук, 41 год, заведующий лабораторией, Центр фундаментальных и прикладных исследований (ЦФПИ) ФГУП "ВНИИА", трудовой договор - основной исполнитель;

Перов Евгений Александрович, 24 года, аспирант, Объединённый институт высоких температур РАН, гражданско-правовой договор - молодой исполнитель;

Дьячков Сергей Александрович, 32 года, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Центр фундаментальных и

прикладных исследований (ЦФПИ) ФГУП "ВНИИА", трудовой договор - молодой исполнитель;

Григорьев Сергей Юрьевич, 31 год, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Центр фундаментальных и прикладных исследований (ЦФПИ) ФГУП "ВНИИА", трудовой договор - молодой исполнитель;

Мурзов Семен Александрович, 30 лет, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Центр фундаментальных и прикладных исследований (ЦФПИ) ФГУП "ВНИИА", трудовой договор - молодой исполнитель.

*на английском языке*

Shepelev Vadim Vladimirovich, 38 years old, Ph. D. (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher, Institute for Computer Aided Design RAS, employment contract - head;

Zhakhovsky Vasily Viktorovich, 58 years old, Ph. D. (Phys.-Math. Sci.), Leading Researcher, Center for Fundamental and Applied Research (CFPI) FSUE "VNIIA", employment contract - main performer;

Khokhlov Victor Alexandrovich, 69 years old, Ph. D. (Phys.-Math. Sci.), Researcher, L.D. Landau ITP RAS, employment contract - main performer;

Il'nitskiy Denis Konstantinovich, 41 years old, Ph. D. (Phys.-Math. Sci.), Head of laboratory, Center for Fundamental and Applied Research (CFPI) FSUE "VNIIA", employment contract - main performer;

Perov Evgenii Alexandrovich, 24 years old, postgraduate student, Joint Institute for High Temperatures RASciences, civil contract - young performer;

Dyachkov Sergey Alexandrovich, 32 years old, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher, Center for Fundamental and Applied Research (CFPI) FSUE "VNIIA", employment contract - young performer;

Grigoriev Sergei Yurievich, 31 years old, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher, Center for Fundamental and Applied Research (CFPI) FSUE "VNIIA", employment contract - young performer;

Murзов Semen Alexandrovich, 30 years old, Ph.D. (Phys.-Math. Sci.), Senior Researcher, Dukhov Research Institute of Automatics (FSUE "VNIIA"), employment contract - young performer;

**Соответствие профессионального уровня членов научного коллектива задачам проекта**

*на русском языке*

Вадим Владимирович Шепелев. Является специалистом по гидродинамическому моделированию взаимодействия лазерного излучения с веществом и разработке вычислительных кодов.

Жаховский Василий Викторович. Является специалистом мирового уровня по молекулярной динамике. В течение

десятилетий публикует многочисленные работы по молекулярно-динамическому и гидродинамическому моделированию задач лазерного воздействия на материалы. Разрабатывает адекватные межатомные потенциалы, которые обеспечивают реалистичность молекулярно-динамических расчетов. Успешно применяет параллельных вычислений для расчета микронных образцов, состоящих из сотен миллионов частиц.

Хохлов Виктор Александрович. Создал лагранжевы гидродинамические коды, имеющие большое значение для решения задач по проекту, как в самостоятельном применении, так и в сочетании с молекулярно-динамическим моделированием. Эти коды содержат двухтемпературную термодинамику в широком диапазоне электронных и ионных температур и плотности и двухтемпературные коэффициенты переноса.

Ильницкий Денис Александрович. Обладает большим научным и практическим опытом в сфере гидродинамического моделирования ударно-волновых процессов и взаимодействия лазерного излучения с веществом. Имеет опыт в том числе, в использовании коммерческих конечно-элементных кодов и самостоятельной реализации реалистичных физических моделей процессов разрушения вещества в результате ударно-волновой нагрузки и детонации.

Григорьев Сергей Юрьевич. Является специалистом в области численного гидродинамического моделирования. Успешно применяет методы молекулярно-динамического моделирования для задач ударного нагружения твердых материалов.

Дьячков Сергей Александрович. Обладает большим и разнообразным опытом в области гидродинамического моделирования задач по взаимодействию лазерного излучения с веществом и ударному нагружению твердых образцов.

Мурзов Семен Александрович. Специализируется на численных методах гидродинамики и молекулярной динамики (МД) и SPH коду, что будет использовано при выполнении работ по проекту. Мастерски владеет пакетом AtomEye, позволяющим строить графические изображения атомов в трехмерном пространстве, что важно для иллюстрации и понимания результатов, которые получаются в МД симуляциях.

Перов Евгений Александрович. Аспирант, молодой ученый, уже успевший однако себя зарекомендовать важными результатами в области молекулярно-динамического моделирования ударно-волновых процессов в металле. Результаты его работы докладывались на всероссийских и международных конференциях в 2021 году и готовятся к публикации в научном журнале высокого мирового уровня.

#### *на английском языке*

Vadim Vladimirovich Shepelev. He is a specialist in hydrodynamic modeling of the interaction of laser radiation with matter and the development of computational codes.

Vasily Viktorovich Zhakhovsky. He is world-class specialist in molecular dynamics. For decades, he has been publishing numerous papers on molecular dynamics and hydrodynamic modeling of problems of laser action on materials. Develops adequate interatomic potentials that ensure the realism of molecular dynamic calculations. Successfully applies parallel computing to calculate micron samples consisting of hundreds of millions of particles.

Khokhlov Viktor Alexandrovich. He created Lagrangian hydrodynamic codes that are of great importance for solving project tasks, both in independent application and in combination with molecular dynamic modeling. These codes contain two-temperature thermodynamics in a wide range of electronic and ionic temperatures and densities and two-temperature transfer coefficients.

Ilitsky Denis Alexandrovich. He has extensive scientific and practical experience in the field of hydrodynamic modeling of shock wave processes and the interaction of laser radiation with matter. He has experience, among other things, in the use of commercial finite element codes and the independent implementation of realistic physical models of the processes of destruction of matter as a result of shock-wave loading and detonation.

Grigoriev Sergey Yurievich. He is a specialist in the field of numerical hydrodynamic modeling. Successfully applies the methods of molecular dynamic modeling for the problems of shock loading of solid materials.

Dyachkov Sergey Alexandrovich. He has extensive and diverse experience in the field of hydrodynamic modeling of problems related to the interaction of laser radiation with matter and shock loading of solid samples.

Murзов Semyon Alexandrovich. Specializes in numerical methods of hydrodynamics and molecular dynamics (MD) and SPH code, which will be used in the execution of work on the project. Masterfully owns the AtomEye package, which allows you to build graphical images of atoms in three-dimensional space, which is important for illustrating and understanding the results that are obtained in MD simulations.

Perov Evgeny Alexandrovich. A graduate student, a young scientist who has already managed to prove himself with important results in the field of molecular dynamic modeling of shock wave processes in metal. The results of his work were reported at all-Russian and international conferences in 2021 and are being prepared for publication in a world-class scientific journal.

#### **1.8. Планируемый объем финансирования проекта Фондом по годам (указывается в тыс. рублей):**

2022 г. - 7000 тыс. рублей,

2023 г. - 7000 тыс. рублей,

2024 г. - 7000 тыс. рублей.

Несоответствие планируемого объема финансирования проекта (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) требованиям пункта 10 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу.

#### **1.9. Научный коллектив по результатам проекта в ходе его реализации предполагает опубликовать в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях не менее**

Приводятся данные за весь период выполнения проекта. Уменьшение количества публикаций (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы) по сравнению с порогом, установленным в пункте 16.2 конкурсной документации, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

В случае представления публикации в изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus), входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>), данная статья учитывается как две публикации.

15 публикаций,

из них

10 в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus).

**Информация о научных изданиях, в которых предполагается опубликовать результаты проекта, в том числе следует указать в каких базах индексируются данные издания - «Сеть науки» (Web of Science Core Collection), «Скопус» (Scopus), РИНЦ, иные базы, а также указать тип публикации - статья, обзор, тезисы, монография, иной тип**

Appl. Surf. Sci. (Q1), J. Appl. Phys. (Q2), Optical and Laser Techn. (Q1), Optics Exp. (Q1), Optics Lett. (Q1), Phys. Rev. B (Q2), Phys. Rev. Appl. (Q1), Comp. Math. and Math. Phys. (Q2), Computer Research and Modeling (Q3) все индексируются WoS, Scopus и РИНЦ

#### **Иные способы обнародования результатов выполнения проекта**

Доклады на конференциях

#### **1.10. Число публикаций членов научного коллектива, опубликованных в период с 1 января 2017 года до даты подачи заявки,**

80, из них

60 – опубликованы в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или в Scopus.

### **1.11. Планируемое участие научного коллектива в международных коллаборациях (проектах) (при наличии)**

**Руководитель проекта подтверждает, что**

- все члены научного коллектива (в том числе руководитель проекта) удовлетворяют пунктам 6, 7, 13 конкурсной документации;
- на весь период реализации проекта руководитель проекта будет состоять в трудовых отношениях с организацией, при этом трудовой договор с организацией не будет предусматривать возможность осуществления трудовой деятельности за пределами территории Российской Федерации;
- при обнародовании результатов любой научной работы, выполненной в рамках поддержанного Фондом проекта, руководитель проекта и научный коллектив будут указывать на получение финансовой поддержки от Фонда и организацию, а также согласны с опубликованием Фондом аннотации и ожидаемых результатов проекта, соответствующих отчетов о выполнении проекта, в том числе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», а также с предоставлением указанных материалов органам власти Российской Федерации, институтам развития;
- помимо гранта Фонда проект не будет иметь других источников финансирования в течение всего периода практической реализации проекта с использованием гранта Фонда;
- проект не является аналогичным по содержанию проекту, одновременно поданному на конкурсы научных фондов и иных организаций;
- проект не содержит сведений, составляющих государственную тайну или относимых к охраняемой в соответствии с законодательством Российской Федерации иной информации ограниченного доступа;
- доля членов научного коллектива в возрасте до 39 лет включительно в общей численности членов научного коллектива будет составлять не менее 50 процентов в течение всего периода практической реализации проекта;
- в установленные сроки будут представляться в Фонд ежегодные отчеты о выполнении проекта и о целевом использовании средств гранта.

**Подпись руководителя проекта \_\_\_\_\_ /В.В. Шепелев/**



## Форма 2. Сведения о руководителе и основных исполнителях проекта

собираются автоматически (частично) на основе анкетных данных руководителя и исполнителей, подтвердивших свое участие. Список исполнителей

формируется в "Форме Т"

### Форма 2. Сведения о руководителе

#### 2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

*на русском языке*

Шепелев Вадим Владимирович

*на английском языке фамилия и инициалы*

Shepelev V.

#### WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [www.ResearcherID.com](http://www.ResearcherID.com).

<https://publons.com/researcher/O-1853-2013/>

#### Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

---

#### ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [orcid.org](http://orcid.org).

<https://orcid.org/0000-0003-4224-1999>

#### 2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

13.04.1983

#### 2.3. Гражданство

РОССИЯ

#### 2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Кандидат физико-математических наук, 2012

#### 2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии), участие в оргкомитетах или программных комитетах известных международных конференций, иной опыт организации международных мероприятий

#### 2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

Руководитель проекта может на момент подачи заявки не являться работником организации, но, в случае победы в конкурсе, должен заключить с ней трудовой договор. В случае, если руководитель проекта не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук (ИАП РАН, г Москва)

#### 2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

*на русском языке*

вычислительная гидродинамика, лазеры, фемтосекундные лазерные импульсы, математическое моделирование, уравнения состояния вещества

*на английском языке*

computational hydrodynamics, lasers, femtosecond laser impulses, mathematical modeling, equations of state of matter

## **2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда**

01-113 01-218 01-310 02-303

## **2.9. Перечень публикаций руководителя проекта, опубликованных в период с 1 января 2017 года до даты подачи заявки, подтверждающий выполнение условия пункта 9 конкурсной документации**

Для лиц, находившихся в указанный в настоящем пункте период в отпусках по беременности и родам, отпусках по уходу за ребенком, а также отпусках работникам, усыновившим ребенка, допускается наличие соответствующих публикаций также в период, предшествующий 1 января 2017 года, и равный продолжительности таких отпусков. Соответствующая информация указывается справочно в настоящем пункте.

Достаточно привести ссылки на публикации в количестве, равном установленному в конкурсной документации порогу.

В случае представления публикации в изданиях, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) или «Скопус» (Scopus), входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>), данная статья в настоящем пункте указывается как одна публикация, но учитывается как две публикации. При этом необходимо указать на принадлежность издания к Q1 и на год принадлежности издания к Q1.

Несоответствие количества публикаций (в том числе отсутствие информации в соответствующих полях формы или отсутствие информации о принадлежности издания к Q1), приводимое в перечне и/или численно в строке ниже, требованиям пункта 9 конкурсной документации является основанием недопуска заявки к конкурсу в соответствии с подпунктом «г» пункта 20 конкурсной документации.

*на английском языке*

1. V.V. Shepelev, S.V. Fortova, Hydrodynamic simulation of laser-induced shock waves using the Turbulence Problem Solver software package, J. Phys.: Conf. Ser., 2057, 012082 (2021), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012082>
2. V.V. Shepelev, N.A. Inogamov, S.V. Fortova, The role of geometry in the generation of a shock wave by a femtosecond laser pulse, J. Phys.: Conf. Ser., 1787, 012023 (2021), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1787/1/012023>
3. Shepelev, V.V., Inogamov, N.A. & Fortova, S.V., Thermal and dynamic effects of laser irradiation of thin metal films, Opt Quant Electron (2020) 52:88. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-2214-0>
4. V. Shepelev, N. Inogamov, S. Fortova, Thermal and dynamic effects of laser irradiation of thin metal films, International Symposium FLAMN-19, June 30 - July 4, 2019, St. Petersburg, Russia.
5. A. Doludenko, S. Fortova, V. Shepelev and E. Son, Numerical simulation of the Rayleigh-Taylor instability of inviscid and viscous fluid, Physica Scripta, <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab028a>
6. V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, Y.V. Petrov, V.V. Shepelev, D.K. Il'inskiy, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, Dynamics of ruthenium mirror under action of soft x-ray ultrashort laser pulse, J. Phys.: Conf. Ser., 1147, 012070 (2019)
7. V.V. Shepelev, N.A. Inogamov, P.A. Danilov, S.I. Kudryashov, A.A. Kuchmizhak, O.B. Vitrik, Ultrashort pulse action onto thin film on substrate: Qualitative model of shock propagation in substrate explaining phenomenon of fast growth of a hole with increase of absorbed energy, J. Phys.: Conf. Ser., 1147, 012065 (2019)
8. V.V. Shepelev, S.V. Fortova, E.I. Oparina, Application of Turbulence Problem Solver (TPS) software complex for numerical modeling of the interaction between laser radiation and metals. Computer Research and Modeling, 10:5 (2018), Pp. 619-630.
9. Godunov, S.K., Klyuchinskii, D.V., Fortova, S.V., Shepelev, V.V., Experimental Studies of Difference Gas Dynamics Models with Shock Waves, Comput. Math. and Math. Phys. (2018) 58: 1201. <https://doi.org/10.1134/S0965542518080067>
10. V.V. Shepelev, N.A. Inogamov, Two-dimensional turning of thermal flux from normal to lateral propagation in thin metal film irradiated by femtosecond laser pulse in thin metal film irradiated by femtosecond laser pulse, J. Phys.: Conf. Ser., 946, 012010 (2018).
11. S.K. Godunov, D.V. Klyuchinskiy, A.V. Safronov, S.V. Fortova and V.V. Shepelev, Experimental study of numerical methods for the solution of gas dynamics problems with shock waves, J. Phys.: Conf. Ser., Volume 946, 012048 (2018).
12. S.V. Fortova, P.S. Utkin, A.P. Pronina, T.S. Narkunas and V.V. Shepelev, Improvement of three-dimensional mathematical model for the simulation of impact of high-speed metallic plates, J. Phys.: Conf. Ser., Volume 946, 012052 (2018).
13. Godunov S.K., Klyuchinskii D. V., Fortova S. V., Shepelev V. V. Experimental studies of difference gas dynamics models

- with shock waves // Computational Mathematics and Mathematical Physics, - 2018, - V. 58, - N. 8, pp. 1201–1216, 2018.
14. Shepelev V.V., Inogamov N.A., Fortova S.V., Danilov P.A., Kudryashov S.I., Kuchmizhak A.A., Vitrik O.B. Action of a femtosecond laser pulse on thin metal film supported by glass substrate // Journal of Physics: Conference Series. 2018, V.1128(1), Paper No. 012092.
15. V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal, V.V. Shepelev, Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation, AIP Conf. Proc, 1793, 100038 (2017).
16. S.V. Fortova, P.S. Utkin, T.S. Narkunas and V.V. Shepelev, Numerical simulation of the impact of high-speed metallic plates using two approaches, Journal of Physics: Conference Series, Volume 899, Number 5 (2017). <http://stacks.iop.org/1742-6596/899/i=5/a=052006>
17. S.V. Fortova, V.V. Shepelev, O.V. Troshkin and S.A. Kozlov, Numerical simulation of the hydrodynamic instabilities of Richtmyer-Meshkov and Rayleigh-Taylor, Journal of Physics: Conference Series, Volume 899, Number 5 (2017).

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

**Перечень содержит 16 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection, Scopus.**

**Перечень содержит 0 публикаций в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>).**

**2.10. Основные научные результаты руководителя проекта за период с 1 января 2017 года (результаты должны подтверждаться сведениями из заявки, например - публикациями) на русском языке**

Разработана физико-математическая модель и программный код для исследования формирования и распространения ударных волн в тонких золотых пленках под действием фемтосекундного лазерного импульса.

Разработана физико-математическая модель и программный код для исследования тепловых и механических явлений в металлических мишенях на двухтемпературной стадии под действием ультракороткого лазерного излучения.

Проведено численное исследование закона неубывания энтропии для линеаризованной разностной схемы типа Годунова для задач газовой динамики.

**на английском языке**

A physicomathematical model and a program code have been developed to study the formation and propagation of shock waves in thin gold films under the action of a femtosecond laser pulse.

A physicomathematical model and a program code have been developed for the study of thermal and mechanical phenomena in metal targets at a two-temperature stage under the action of ultrashort laser radiation.

A numerical study of the entropy non-decreasing law for a linearized Godunov-type difference scheme for gas dynamics problems is carried out.

**2.11. Общее число публикаций за период с 1 января 2017 года, 26, из них: 15 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus,**

**в том числе 0 в изданиях, входящих в первый квартиль (Q1) по импакт-фактору JCR Science Edition или JCR Social Sciences Edition, по SJR (принадлежность издания к Q1 в Scopus определяется по базе данных <http://www.scimagojr.com/>).**

**2.12. Дополнительный список публикаций руководителя проекта с 1 января 2017 года (монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по**

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях руководителя проекта, за исключением публикаций, указанных в п. 2.9 настоящей формы.

*на английском языке*

**2.13. Опыт выполнения научных проектов** (указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)

*на русском языке*

Исполнитель: Государственное задание 2019: Тема «Разработка математических моделей, вычислительных алгоритмов и программных комплексов для моделирования процессов гидродинамических неустойчивостей, турбулентности, горения и детонации в задачах механики сплошных сред с различными уравнениями состояния вещества», № 0019-2019-0003 (в системе Минобрнауки)

*на английском языке*

**В том числе проектов, финансируемых РНФ (при наличии):**

Являлся исполнителем проекта № 14-19-01599, 2014-2016 гг.

Являлся исполнителем проекта № 14-11-00719, 2014-2016 гг.

Являлся исполнителем проекта № 17-11-01293, 2017-2019 гг.

Являюсь исполнителем проекта № 17-11-01293 (продление), 2020-2021 гг.

**2.14. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2022 году**

Общее количество – 1, из них:

руководство – 1, участие в качестве исполнителя – 0,

а именно:

планирую участие в проекте РНФ, для которого заполняется настоящая заявка.

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

**2.15. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на руководство данным проектом в случае победы в конкурсе Фонда -**

50 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

**2.16. Предполагаемая форма трудовых отношений\*\* с организацией, через которую будет осуществляться финансирование:**

\*\*В соответствии с пунктом 8 конкурсной документации трудовой договор с руководителем проекта не может предусматривать возможность осуществления трудовой деятельности за пределами территории Российской Федерации.

В соответствии со статьями 91, 100 ТК РФ исчисление продолжительности рабочего времени осуществляется исходя из еженедельного графика работы (за исключением (ст. 104 ТК РФ) работников, занятых на круглосуточных непрерывных работах, а также на других видах работ, где по условиям производства (работы) не может быть соблюдена установленная ежедневная или еженедельная продолжительность рабочего времени).

Работа в режиме гибкого рабочего времени (ст. 102 ТК РФ) должна обеспечивать отработку работником суммарного количества рабочих часов в течение рабочего дня или недели.

Руководитель проекта может на момент подачи заявки не являться работником организации, но, в случае победы в конкурсе, должен заключить с ней трудовой договор. В случае, если руководитель проекта не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все

процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

*Организация будет являться основным местом работы (характер работы – не дистанционный):* **да;**

*Трудовой договор по совместительству (характер работы – не дистанционный):* **нет;**

*Трудовой договор о дистанционной работе (место осуществления трудовой деятельности расположено на территории Российской Федерации):* **нет.**

**2.17. Опыт образовательной деятельности за последние 5 лет** (указывается информация о руководстве аспирантами, адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)

2021 год, НИЯУ МИФИ, курс "Языки программирования в имитационном моделировании"

**2.18. Почтовый адрес**

140105, Московская обл., г. Раменское, ул. Чугунова, д.43, кв. 307

**2.19. Контактный телефон**

+79057073586

**2.20. Электронный адрес (E-mail)**

vadim.aries@gmail.com

**2.21. Участие в проекте:**

Руководитель проекта

**2.22. Файлы с дополнительной информацией** (резюме, другая дополнительная информация, которая, по мнению руководителя проекта, может быть полезна при проведении экспертизы данного проекта)

В формате pdf, до 3 Мб.

на русском языке

---

на английском языке

---

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 6 и 7 конкурсной документации) ознакомлен и согласен. Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Шепелев Вадим Владимирович
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	<div>Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</div>
Адрес проживания	140105, Московская обл., г. Раменское, ул. Чугунова, д.43, кв. 307
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие\*\*\*\* на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

\*\*\* Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

\*\*\*\* Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись руководителя проекта \_\_\_\_\_ /В.В. Шепелев/

Дата подписания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

## Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

### 2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

*на русском языке*

Жаховский Василий Викторович

*на английском языке фамилия и инициалы*

Zhakhovsky V.V.

### WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [www.ResearcherID.com](http://www.ResearcherID.com).

<https://publons.com/researcher/G-9560-2011/>

### Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57200771645>

### ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [orcid.org](http://orcid.org).

<https://orcid.org/0000-0001-6620-6616>

### 2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

14.01.1963

### 2.3. Гражданство

РОССИЯ

### 2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Кандидат физико-математических наук, 1997

### 2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии)

стипендия постдока от Японского Общества Содействия Науки, Osaka University, fellow ID No. P98042 (1998-2000);

награда за академические успехи Osaka University (2000-2001);

стипендия исследователя от Японского Общества Содействия Науки, Osaka University, fellow ID No. L03541 (2003-2004);

член American Physical Society, ID number 61069853;

рецензент журналов Physical Review Letters, Physical Review B, Journal of Applied Physics, Applied Physics Letters, Journal of Physical Chemistry

### 2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

ведущий научный сотрудник, федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова" (ФГУП "ВНИИА", г Москва)

### 2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

*на русском языке*

ударные волны и детонация, лазерная абляция и откол, межатомные потенциалы, молекулярно-динамическое моделирование

*на английском языке*

shock wave, detonation, ablation, spallation, femtosecond laser, interatomic potential, molecular dynamics simulation

## **2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда**

02-201 02-204 02-206 09-202

## **2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2017 года, 70, из них:**

**70 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus.**

**2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2017 года** *(монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))*

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях.

*на английском языке*

D. I. Zhukhovitskii, V. V. Zhakhovsky, "Thermodynamics and the structure of clusters in the dense Au vapor from molecular dynamics simulation", Journal of Chemical Physics, 152, 224705 (2020) <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0010156> , IF 2.991

I. Milov, V. Zhakhovsky, D. Ilnitsky, et al, "Two-level ablation and damage morphology of Ru films under femtosecond extreme UV irradiation", Applied Surface Science, 528, 146952 (2020)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433220317098?via%3Dihub> , IF 5.155

I. Milov, V. Lipp, D. Ilnitsky, N. Medvedev, K. Migdal, V. Zhakhovsky, et al, "Similarity in ruthenium damage induced by photons with different energies: From visible light to hard X-rays", Applied Surface Science, 501, 143973 (2020)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433219327898?via%3Dihub> , IF 5.155

A.V. Andriyash, V.A. Arinin, S.A. Dyachkov, et al, "Long-term evolution of spherical shell with boron carbide layer after explosive compression", Journal of Applied Physics, 126, 085903 (2019)  
<https://link.springer.com/article/10.1134/S1063776120030097> , IF 2.328

Egorova M.S., Dyachkov S.A., Parshikov A.N., Zhakhovsky V.V., "Parallel SPH modeling using dynamic domain decomposition and load balancing displacement of Voronoi subdomains", Computer Physics Communications, 234, 112-125 (2019)  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010465518302765?via%3Dihub> , IF 3.309

V.V. Zhakhovsky, A.P. Kryukov, V.Yu. Levashov, I.N. Shishkova, S.I. Anisimov, "Mass and heat transfer between evaporation and condensation surfaces: Atomistic simulation and solution of Boltzmann kinetic equation", Proceedings of the National Academy of Sciences, 116, 18209-18217 (2019) <https://www.pnas.org/content/116/37/18209> , IF 9.58

S.Yu. Grigoryev, B.V. Lakatosh, M.S. Krivokorytov, V.V. Zhakhovsky, et al, "Expansion and Fragmentation of a Liquid-Metal Droplet by a Short Laser Pulse", Phys. Rev. Applied, 10, 064009 (2018)  
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.10.064009> , IF 4.8

Ishino M., Inogamov N.A., Tamotsu S., Zhakhovsky V.V., et al, "Study of damage structure formation on aluminum film targets by picosecond soft X-ray laser ablation around threshold region", Applied Physics A, 124, 649 (2018) IF 1.784



Dyachkov S.A., Parshikov A.N., Egorova M.S., Grigoryev S.Yu., Zhakhovsky V.V., Medin S.A., "Explicit failure model for boron carbide ceramics under shock loading", Journal of Applied Physics, 124, 085902 (2018) IF 2.328

Kohmura Y., Zhakhovsky V., Takei D., Suzuki Y., Takeuchi A., Inoue I., Inubushi Y., Inogamov N., Ishikawa T., Yabashi M., "Nanostructuring of multi-layer material by single x-ray vortex pulse with femtosecond duration", Applied Physics Letters, 112, 123103 (2018) IF 3.521

B. Albertazzi, N. Ozaki, V. Zhakhovsky, et al, "Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress", Science Advances, 3, e1602705 (2017) IF 12.804

Wang, X.W., Kuchmizhak, A.A., Li, X., Juodkazis, S., Vitrik, O.B., Kulchin, Y.N., Zhakhovsky, V.V., et al, "Laser-Induced Translative Hydrodynamic Mass Snapshots: Noninvasive Characterization and Predictive Modeling via Mapping at Nanoscale", Phys. Rev. Applied, 8, 044016 (2017) IF 4.8

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

**2.11. Опыт выполнения научных проектов** (указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)  
на русском языке

РНФ 19-19-00697 "Изучение свойств, создание и модификация наноматериалов с помощью сверхкоротких лазерных импульсов"  
2019-2021

РФФИ 17-08-00805 "Разработка методов расчета процессов переноса через межфазные поверхности и их экспериментальная проверка на гелии II" 2017-2018

на английском языке

**2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2022 году**

Общее количество – 2, из них:

руководство – 0, участие в качестве исполнителя – 2,

а именно:

РНФ

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

**2.13. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на участие в данном проекте в случае победы в конкурсе Фонда -**  
40 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

**2.14. Участие в образовательной деятельности** (указывается информация о руководстве аспирантами, адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)

**2.15. В 2020 или в 2021 годах участвовал в качестве руководителя проекта, финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):**

Являюсь исполнителем проекта № 19-19-00697, 2019-2021 гг.

**2.16. Контактный телефон, электронный адрес (E-mail)**

+79647998254, 6asi1z@gmail.com

**2.17. Участие в проекте:**

Основной исполнитель проекта

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 7 и 8 конкурсной документации) ознакомлен и согласен. Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Жаховский Василий Викторович
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!
Адрес проживания	105037, Москва, 2ая Парковая, 11, 19
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие\*\*\*\* на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

\*\*\* Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

\*\*\*\* Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись исполнителя проекта \_\_\_\_\_/В.В. Жаховский/

Дата подписания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

## Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

### 2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

*на русском языке*

Ильницкий Денис Константинович

*на английском языке фамилия и инициалы*

Ilnitsky D.

### WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [www.ResearcherID.com](http://www.ResearcherID.com).

---

### Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55948541900>

### ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [orcid.org](http://orcid.org).

<https://orcid.org/0000-0001-5149-1995>

### 2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

19.02.1980

### 2.3. Гражданство

РОССИЯ

### 2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Кандидат физико-математических наук, 2019

### 2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии)

### 2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

заведующий лабораторией, федеральное государственное унитарное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова" (ФГУП "ВНИИА", г Москва)

### 2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

*на русском языке*

Лазерное взаимодействие с веществом, физика взрыва, разрушение и деформация материалов

*на английском языке*

Laser matter interaction

### 2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

02-208

### 2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2017 года, 12, из них:

12 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus.

**2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2017 года** (монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях.  
на английском языке

Laser shock peening

Inogamov, N.A., Zhakhovsky, V.V., Ilnitsky, D.K., Khokhlov, V.A.

Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1787(1), 012024

Petrov, Y., Migdal, K., Inogamov, N., Khokhlov, V., Ilnitsky, D., Milov, I., Medvedev, N., Lipp, V., Zhakhovsky, V.  
Ruthenium under ultrafast laser excitation: Model and dataset for equation of state, conductivity, and electron-ion coupling  
(2020) Data in Brief, 28, статья № 104980, .

DOI: 10.1016/j.dib.2019.104980

Milov, I., Lipp, V., Ilnitsky, D., Medvedev, N., Migdal, K., Zhakhovsky, V., Khokhlov, V., Petrov, Y., Inogamov, N., Semin, S., KimeL, A., Ziaja, B., Makhotkin, I.A., Louis, E., Bijkerk, F.  
Similarity in ruthenium damage induced by photons with different energies: From visible light to hard X-rays  
(2020) Applied Surface Science, 501, статья № 143973, .

DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143973

Ilnitsky, D.K., Gorodnichev, K.E., Serezhkin, A.A., Kuratov, S.E., Inogamov, N.A., Gorodnichev, E.E.  
A viscosity effect on development of instabilities at the interface between impacted plates  
(2019) Physica Scripta, 94 (7), статья № 074003, .

DOI: 10.1088/1402-4896/ab085c

Ilnitsky, D.K., Dyachkov, S.A., Inogamov, N.A., Zhakhovsky, V.V.  
Mechanical anisotropy of energetic polycrystals as possible initiation mechanism  
(2019) Journal of Physics: Conference Series, 1147 (1), статья № 012040, .

DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012040

Khokhlov, V.A., Zhakhovsky, V.V., Petrov, Yu.V., Shepelev, V.V., Ilnitsky, D.K., Migdal, K.P., Inogamov, N.A.  
Dynamics of ruthenium mirror under action of soft x-ray ultrashort laser pulse  
(2019) Journal of Physics: Conference Series, 1147 (1), статья № 012070, .

DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012070

Ilnitsky, D., Gorodnichev, K., Serezhkin, A., Kuratov, S., Inogamov, N.  
The Influence of the Presence of Viscosity on Evolution of Perturbations in the System of Colliding Plates  
(2019) Journal of Physics: Conference Series, 1238 (1), статья № 012036, .

DOI: 10.1088/1742-6596/1238/1/012036

Grigoryev, S.Yu., Lakatos, B.V., Krivokorytov, M.S., Zhakhovsky, V.V., Dyachkov, S.A., Il'nitsky, D.K., Migdal, K.P., Inogamov, N.A., Vinokhodov, A.Yu., Kompanets, V.O., Sidel'nikov, Yu.V., Krivtsov, V.M., Koshelev, K.N., Medvedev, V.V.

Expansion and Fragmentation of a Liquid-Metal Droplet by a Short Laser Pulse

(2018) Physical Review Applied, 10 (6), статья № 064009, .

DOI: 10.1103/PhysRevApplied.10.064009

Il'nitsky, D., Inogamov, N., Zhakhovsky, V.

Response of explosive HMX to low-velocity impact: Modeling by the crystal plasticity finite element method

(2018) Journal of Physics: Conference Series, 941 (1), статья № 012052, .

DOI: 10.1088/1742-6596/941/1/012052

Albertazzi, B., Ozaki, N., Zhakhovsky, V., Faenov, A., Habara, H., Harmand, M., Hartley, N., Il'nitsky, D., Inogamov, N., Inubushi, Y., Ishikawa, T., Katayama, T., Koyama, T., Koenig, M., Krygier, A., Matsuoka, T., Matsuyama, S., McBride, E., Migdal, K.P., Morard, G., Ohashi, H., Okuchi, T., Pikuz, T., Purevjav, N., Sakata, O., Sano, Y., Sato, T., Sekine, T., Seto, Y., Takahashi, K., Tanaka, K., Tange, Y., Togashi, T., Tono, K., Umeda, Y., Vinci, T., Yabashi, M., Yabuuchi, T., Yamauchi, K., Yumoto, H., Kodama, R.

Dynamic fracture of tantalum under extreme tensile stress

(2017) Science Advances, 3 (6), статья № e1602705, .

DOI: 10.1126/sciadv.1602705

Khokhlov, V.A., Inogamov, N.A., Zhakhovsky, V.V., Il'nitsky, D.K., Migdal, K.P., Shepelev, V.V.

Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation

(2017) AIP Conference Proceedings, 1793, статья № 100038, .

DOI: 10.1063/1.4971663

Inogamov, N.A., Khokhlov, V.A., Petrov, Y.V., Zhakhovsky, V.V., Migdal, K.P., Il'nitsky, D.K., Hasegawa, N., Nishikino, M., Yamagiwa, M., Ishino, M., Kawachi, T., Faenov, A.Y., Pikuz, T.A., Baba, M., Minami, Y., Suemoto, T.

Rarefaction after fast laser heating of a thin metal film on a glass mount

(2017) AIP Conference Proceedings, 1793, статья № 070012, .

DOI: 10.1063/1.4971600

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

**2.11. Опыт выполнения научных проектов** (указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)

на русском языке

на английском языке

## **2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2022 году**

Общее количество – 1, из них:

руководство – 0, участие в качестве исполнителя – 1,

а именно:

РНФ

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

## **2.13. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на участие в данном проекте в случае победы в конкурсе Фонда -**

50 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

## **2.14. Участие в образовательной деятельности** *(указывается информация о руководстве аспирантами, адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)*

## **2.15. В 2020 или в 2021 годах участвовал в качестве руководителя проекта, финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):**

## **2.16. Контактный телефон, электронный адрес (E-mail)**

+74999728499, denisilnitskiy@gmail.com

## **2.17. Участие в проекте:**

Основной исполнитель проекта

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 7 и 8 конкурсной документации) ознакомлен и согласен. Подтверждаю свое участие в проекте.

<b>Фамилия, имя и отчество</b>	Ильницкий Денис Константинович
<b>Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)</b>	Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!
<b>Адрес проживания</b>	127055, Москва , ул Сущевская 22
<b>Оператор персональных данных</b>	Российский научный фонд

Я выражаю согласие\*\*\*\* на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

\*\*\* Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

\*\*\*\* Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись исполнителя проекта \_\_\_\_\_ /Д.К. Ильницкий/

Дата подписания « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.



## Форма 2. Сведения об основном исполнителе проекта

### 2.1. Фамилия, имя, отчество (при наличии)

*на русском языке*

Хохлов Виктор Александрович

*на английском языке фамилия и инициалы*

Khokhlov V.A.

### WoS ResearcherID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [www.ResearcherID.com](http://www.ResearcherID.com).

<https://publons.com/researcher/Q-8055-2016/>

### Scopus AuthorID (при наличии)

Scopus AuthorID формируется в базе данных Scopus автоматически при появлении у автора хотя бы одной статьи в данной базе. AuthorID указан в авторском профиле, который становится доступен, если при поиске автора в базе данных Scopus (Author Search) в результатах поиска нажать на фамилию автора.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=36091200200>

### ORCID (при наличии)

Можно получить, зарегистрировавшись по адресу [orcid.org](http://orcid.org).

<https://orcid.org/0000-0001-9126-0243>

### 2.2. Дата рождения (указывается цифрами – число, месяц, год)

25.11.1952

### 2.3. Гражданство

РОССИЯ

### 2.4. Ученая степень, год присуждения

В случае наличия нескольких ученых степеней, указывается та из них, которая наиболее соответствует тематике проекта.

Кандидат физико-математических наук, 1990

### 2.5. Награды и премии за научную деятельность, членство в ведущих научных сообществах (при наличии), участие в редколлегиях ведущих рецензируемых научных изданий (при наличии)

### 2.6. Основное место работы на момент подачи заявки – должность, полное наименование организации (сокращенное наименование организации)

научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук (ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, Московская обл)

### 2.7. Область научных интересов – ключевые слова (приводится не более 15 ключевых слов)

*на русском языке*

взаимодействие коротких лазерных импульсов с веществом, гидродинамические неустойчивости, вычислительная математика

*на английском языке*

interaction of short laser pulses with matter, hydrodynamic instabilities, computational mathematics

### 2.8. Область научных интересов – коды по классификатору Фонда

01-218 01-309 02-210 02-302 09-202

## 2.9. Общее число публикаций за период с 1 января 2017 года, 47, из них:

27 - опубликовано в изданиях, индексируемых в Web of Science Core Collection или Scopus.

**2.10. Список публикаций основного исполнителя проекта с 1 января 2017 года** (монографии, результаты интеллектуальной деятельности, имеющие правовую охрану, публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, публикации в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science Core Collection, Scopus, приводится не более 10 публикаций, при наличии публикации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» указывается ссылка на нее (обязательно для публикаций в индексируемых изданиях), указывается, при наличии, импакт-фактор научного издания (по JCR Science Edition, JCR Social Sciences Edition или SJR))

Пункт не является обязательным к заполнению. Могут приводиться публикации, свидетельствующие о научной квалификации и достижениях.

*на английском языке*

1. N.A. Inogamov, S.A. Romashevskiy, A.I. Ignatov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, E.M. Eganova, E.A. Pershin, S.I. Ashitkov, Diffraction on a Microbubble and the Morphology of the Silicon Surface Irradiated through Glycerol by a Pair of Femtosecond Laser Pulses, JETP Letters, 113 (2), 75-81 (2021)

<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0021364021020065>

DOI: 10.1134/S0021364021020065

Impact Factor 1.399 (Q2)

2. S.A. Romashevskiy, V.A. Khokhlov, S.I. Ashitkov, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, P.S. Komarov, A.N. Parshikov, Yu.V. Petrov, E.V. Struleva, P.A. Tsygankov, Femtosecond Laser Irradiation of a Multilayer Metal--Metal Nanostructure JETP Letters, 113, 308-316 (2021)

<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS002136402105009X>

DOI: 10.1134/S002136402105009X

Impact Factor 1.399 (Q2)

3. I. Milov, V. Lipp, D. Ilnitsky, N. Medvedev, K. Migdal, V. Zhakhovsky, V. Khokhlov, Yu. Petrov, N. Inogamov, S. Semin, A. KimeI, B. Ziaja, I.A. Makhotkin, E. Louisa, F. Bijkerk, Similarity in ruthenium damage induced by photons with different energies: From visible light to hard X-rays, Applied Surface Science, 501, 143973 (2020),

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433219327898?via%3Dihub>

DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.143973, WoS: 000504658100050, Scopus: 2-s2.0-85073254770,

Impact Factor 6.182 (Q1)

4. I. Milov, V. Zhakhovsky, D. Ilnitsky, K. Migdal, V. Khokhlov, Yu. Petrov, N. Inogamov, V.Lipp, N. Medvedev, B. Ziaja, V. Medvedev, I.A.Makhotkin, E.Louis, F. Bijkerk, Two-level ablation and damage morphology of Ru films under femtosecond extreme UV irradiation,

Applied Surface Science, 528, 146952 (2020),

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433220317098?via%3Dihub>

DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146952, Scopus: 2-s2.0-85087332352

Impact Factor 6.182 (Q1)

5. N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, Yu.V. Petrov, V. V. Zhakhovsky, Hydrodynamic and molecular-dynamics modeling of laser ablation in liquid: from surface melting till bubble formation,

Optical and Quantum Electronics, 52(2), art. 63 (2020),

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-019-2168-2>

DOI: 10.1007/s11082-019-2168-2, Scopus: 2-s2.0-85078269096.

Impact Factor 1.842 (Q2)

6. N.A.Inogamov, Yu.V Petrov,V.A. Khokhlov, V.A., V. V. Zhakhovskii, Laser Ablation: Physical Concepts and Applications (Review). High. Temp. 58, 632–646 (2020).

<https://doi.org/10.1134/S0018151X20040045>

[Н.А. Иногамов, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, В.В. Жаховский, Лазерная абляция: Физические представления и приложения

(обзор), Теплофизика высоких температур, 58(4), 689-706 (2020).

DOI: 10.31857/S0040364420040043]

Impact Factor 1.085 (Q2)

7. Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, Hydrodynamic phenomena induced by laser ablation of metal into liquid,

Applied Surface Science 492, 285-297 (2019),

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433219316459?via%3Dihub>

DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.325, Scopus: 2-s2.0-85067930581

Импакт-фактор 5.155 (Q1)

8. S.I. Anisimov, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, K.P. Migdal, Yu.V. Petrov, V.A. Khokhlov, High-Energy-Density Physics and Laser Technologies,

J. Exp. Theor. Phys., 129(4), 757-782 (2019)

<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063776119100169>

DOI: S1063776119100169

[С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, К.П. Мигдал, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, Физика высоких плотностей энергии и лазерные технологии, ЖЭТФ, 156(4), 806-836 (2019)

<http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index/r/156/4/p806?a=list>

DOI: 10.1134/S0044451019100249]

WoS: 000511119900024, Scopus: 2-s2.0-85076533658.

Impact Factor 1.119 (Q2)

9. N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovskii, V.A. Khokhlov, Dynamics of Gold Ablation into Water,

J. Exp. Theor. Phys. 127, 79–106 (2018).

<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1063776118070075>

DOI: S1063776118070075

[Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, В.А. Хохлов, Динамика абляции золота в воду, ЖЭТФ, 154(1), 92-123 (2018).

<http://www.jetp.ac.ru/cgi-bin/r/index/r/154/1/p92?a=list>

DOI: 10.1134/S004445101807009X]

WoS: 000442614400009, Scopus: 2-s2.0-85052288005.

Impact Factor 0.946 (Q2)

10 N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, Formation of a Single Microstructure and Ablation into a Transparent Dielectric Material under Subnanosecond Laser Irradiation, JETP Lett., 108 (7), 439-445 (2018)

[Н.А. Иногамов, В.А. Хохлов, В.В. Жаховский, Формирование уединенной микроструктуры и абляция в прозрачный диэлектрик при субнаносекундном лазерном воздействии, Письма в ЖЭТФ, 108 (7), 470-477 (2018)]

<https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0021364018190086>

DOI: 10.1134/S0021364018190086, WoS: 000460138100003, Scopus: 2-s2.0-85062212620

Impact Factor 1.532 (Q2)

11. N. Inogamov, V. Zhakhovsky, V. Khokhlov, Laser ablation of metal into liquid: Near critical point phenomena and hydrodynamic instability, AIP Conf. Proc. 1979, 190001 (2018); arXiv:1803.07343.

12. N. Inogamov, V. Zhakhovsky, V. Khokhlov, Warm dense matter in extremely small volume - Hydrodynamics of nanofilms triggered by laser irradiation at diffraction limit, AIP Conf. Proc. 1979, 190002 (2018), Scopus: 2-s2.0-85049785976.

13. N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, V.A. Khokhlov, Laser ablation caused by geometrically constrained illumination and inventive target design, J. Phys.: Conf. Ser., 946, 012008 (2018), Scopus: 2-s2.0-85043689257.

14. N.A. Inogamov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, Yu.V. Petrov, Energy redistribution between layers in multi-layered target heated by X-ray pulse, J. Phys.: Conf. Ser., 946, 012009 (2018), Scopus: 2-s2.0-85043710264.

15. S.I. Anisimov, V.V. Zhakhovsky, N.A. Inogamov, S.A. Murzov, V.A. Khokhlov, Formation and crystallisation of a liquid jet in a film exposed to a tightly focused laser beam,

Quantum Electron., 47(6), 509-521 (2017)

<https://iopscience.iop.org/article/10.1070/QEL16381>

[С.И. Анисимов, В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, С.А. Мурзов, В.А. Хохлов, О формировании и кристаллизации жидкой струи, возникающей при воздействии на пленку остросфокусированным лазерным пучком, Квантовая электроника, 47(6), 509-521 (2017),

DOI: 10.1070/QEL16381, WoS: 000404958300003, Scopus: 2-s2.0-85021829753.

Impact Factor 1.151 (Q2)

Для русскоязычных названий сведения приводятся на русском языке и в переводе на английский язык. При этом должно быть понятно, что речь идет об одном и том же документе (например, добавляйте слово «перевод»).

### **2.11. Опыт выполнения научных проектов** (указываются наименования фондов (организаций), их местонахождение (страна), форма участия, номера, названия проектов и сроки выполнения за последние 5 лет)

*на русском языке*

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН

«Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» (2018), исполнитель

Программа фундаментальных исследований Президиума РАН

«Теплофизика высоких плотностей энергии» (2015-2017), исполнитель

*на английском языке*

Program of Fundamental Research of the Presidium of the RAS

"Condensed matter and plasma at high energy densities" (2018), the participant

Program of Fundamental Research of the Presidium of the RAS

"Thermal physics of high energy densities" (2015-2017), the participant

### **2.12. Планируемое участие в научных проектах (в любом качестве) в 2022 году**

Общее количество – 2, из них:

руководство – 0, участие в качестве исполнителя – 2,

а именно:

РНФ

(указываются в том числе грантодатели или заказчики проектов и источник финансирования, например – государственное задание учредителя, гранты РФФИ, ФПИ, РНФ, иных фондов или иных организаций, государственный контракт (заказчик, программа), иной хозяйственный договор, иные гранты и субсидии).

### **2.13. Доля рабочего времени, которую планируется выделить на участие в данном проекте в случае победы в конкурсе Фонда -**

50 процентов.

Имеется в виду – от полной занятости в рамках трудовых или гражданско-правовых правоотношений, т.е. занятость в свободное от основной работы время также должна учитываться.

### **2.14. Участие в образовательной деятельности** (указывается информация о руководстве аспирантами, адъюнктами, интернами, ординаторами, разработке и чтении новых образовательных курсов в российских и зарубежных вузах)

**2.15. В 2020 или в 2021 годах участвовал в качестве руководителя проекта, финансируемого Фондом, или исполнителя проекта, финансируемого Фондом, в следующих проектах (при наличии):**

**2.16. Контактный телефон, электронный адрес (E-mail)**

+79032130112, khokhlov@landau.ac.ru

**2.17. Участие в проекте:**

Основной исполнитель проекта

С условиями конкурса Фонда (в том числе, с пунктами 7 и 8 конкурсной документации) ознакомлен и согласен. Подтверждаю свое участие в проекте.

Фамилия, имя и отчество	Хохлов Виктор Александрович
Данные документа, удостоверяющего личность*** (серия, номер, сведения о дате и органе выдачи)	<div>Внимание! Данное поле заполняется вручную в печатном экземпляре заявки. Заполнение обязательно!</div>
Адрес проживания	109659 Москва, Луговой проезд, д. 1/8, кв. 290
Оператор персональных данных	Российский научный фонд

Я выражаю согласие\*\*\*\* на обработку указанным выше оператором персональных данных, внесенных в настоящую форму мною лично.

Обработка Российским научным фондом (адрес: г. Москва, ул. Солянка, д. 14, строение 3) указанных выше персональных данных может осуществляться **посредством** их сбора, систематизации, накопления, хранения, уточнения, использования, блокирования, распространения на официальном сайте Российского научного фонда, передачи и уничтожения **с целью** проведения экспертизы заявок на конкурсы, проводимые Российским научным фондом, экспертизы проектов и программ, финансируемых Российским научным фондом, подготовки аналитических материалов по конкурсам, долговременного сохранения документированной информации об участниках программ, получивших финансирование Российского научного фонда, общедоступного раскрытия информации о руководителях программ и проектов, финансируемых Российским научным фондом. Указанная обработка моих данных может осуществляться в течение 75 лет со дня заполнения настоящей формы в печатной форме. Хранение настоящей формы может быть поручено ООО «РАЙСВОЛФ» (107150, Москва, ул. Бойцовая, д. 22), оказывающему Российскому научному фонду услуги архивного хранения документов. Настоящее согласие может быть отозвано посредством направления на указанный выше адрес оператора персональных данных заявления с требованием о прекращении обработки персональных данных. Заявление должно содержать номер документа, удостоверяющего личность субъекта персональных данных; сведения о дате выдачи указанного документа и выдавшем его органе, а также собственноручную подпись субъекта персональных данных.

\*\*\* Непредставление данных документа, удостоверяющего личность, является основанием недопуска заявки к конкурсу.

\*\*\*\* Заполнение является обязательным в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 июля 2006 г. №152-ФЗ «О персональных данных».

Подпись исполнителя проекта \_\_\_\_\_/В.А. Хохлов/

Дата подписания «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

## Форма 3. Сведения об организации

собираются автоматически на основе регистрационных данных организации, через которую будет осуществляться финансирование ("Форма Т")

### 3.1. Полное наименование *(приводится в соответствии с регистрационными документами)*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации проектирования Российской академии наук

### 3.2. Сокращенное наименование

ИАП РАН

### 3.3. Наименование на английском языке

Institute for Computer Aided Design of the Russian Academy of Sciences

### 3.4. Организационно-правовая форма *(указывается по ОКОПФ)*

Федеральные государственные бюджетные учреждения

### 3.5. Форма собственности *(указывается по ОКФС)*

Федеральная собственность

### 3.6. Ведомственная принадлежность

Министерство науки и высшего образования РФ

### 3.7. ИНН, КПП, ОГРН, ОКТМО

7710031045, 771001001, 1037739362550, 45380000

### 3.8. Адрес

123056, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д. 19/18

### 3.9. Фактический адрес

123056, г. Москва, ул. 2-я Брестская, д. 19/18

### 3.10. Субъект Российской Федерации

г Москва

### 3.11. Должность, фамилия, имя, *отчество (при наличии)* руководителя организации

Директор, Никитин Илья Степанович

### 3.12. Контактный телефон

+74992500262

### 3.13. Электронный адрес *(E-mail)*

icad@icad.org.ru

### Руководитель организации подтверждает, что:

- ознакомлен с условиями конкурса Фонда и согласен на финансирование проекта, в случае его поддержки, через организацию;
- согласен с пунктами 8, 14, 33, 35, 36 конкурсной документации, иными условиями конкурса;
- подтверждает сведения о руководителе проекта, изложенные в данной заявке;
- организация исполняет обязательства по уплате налогов в бюджеты всех уровней и обязательных платежей в государственные внебюджетные фонды, платежеспособна, не находится в процессе ликвидации, не признана несостоятельной (банкротом), на ее имущество не наложен арест и ее экономическая деятельность не приостановлена;
- в случае признания заявки победителем организация берет на себя следующие обязательства:

- заключить с членами научного коллектива гражданско-правовые или трудовые (срочные трудовые) договоры (Трудовые договоры с руководителем проекта и членами научного коллектива не могут предусматривать возможность осуществления трудовой деятельности за пределами территории Российской Федерации);

Если таковые не заключены ранее. В случае, если член научного коллектива не является гражданином Российской Федерации, организацией должны быть выполнены все процедуры, предусмотренные законодательством Российской Федерации при трудоустройстве иностранных граждан.

- по поручению руководителя проекта выплачивать членам научного коллектива вознаграждение за выполнение работ по проекту;
- ежегодно в установленные сроки представлять отчет о целевом использовании гранта Российского научного фонда.

#### **Руководитель организации гарантирует, что:**

- вознаграждение за выполнение работ по реализации проекта будет ежегодно получать каждый член научного коллектива;

Лица, не являющиеся налоговыми резидентами Российской Федерации, могут осуществлять работы по проекту на безвозмездной основе (за исключением руководителя проекта).

- общий размер ежегодного вознаграждения члена научного коллектива не будет превышать 30 процентов от суммы ежегодного вознаграждения всем членам научного коллектива;

Включая установленные законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний.

- общий размер ежегодного вознаграждения членов научного коллектива в возрасте до 39 лет включительно не будет меньше 35 процентов от суммы ежегодного вознаграждения всех членов научного коллектива;
- общее число членов научного коллектива (вместе с руководителем проекта) не будет превышать 10 человек, при этом членом научного коллектива не будет являться работник организации, в непосредственном административном подчинении которого находится руководитель проекта;
- научному коллективу будет предоставлено помещение и обеспечен доступ к имеющейся экспериментальной базе для осуществления научного исследования.

**Подпись руководителя организации** (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации.**

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации.

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
М.П.



## Форма 4. Содержание проекта

### 4.1. Научная проблема, на решение которой направлен проект

#### *на русском языке*

Сложность и комплексность задач по взаимодействию лазерного излучения с веществом бросает вызов одному из наиболее эффективных способов их решения, а именно, численному моделированию. В настоящее время не существует пакетов прикладных программ, совмещающих возможности гидродинамического и молекулярно-динамического моделирования. Такие известные программные продукты, как ABAQUS или LS-DYNA, которые используются в моделировании лазерных задач, задействуют континуальный подход, не предлагая атомистические компоненты. Молекулярно-динамические коды, такие, как, например, LAMMPS в свою очередь, работают только с дискретными системами частиц, не имея в своем арсенале гидродинамических моделей. Поэтому сейчас высока актуальность создания программного пакета, который бы позволял комбинировать континуальный гидродинамический и дискретный молекулярно-динамический подходы для моделирования задач взаимодействия лазерного излучения с металлами. В рамках данного проекта будет создан программный продукт Laser Problem Solver (LPS), с помощью которого планируется решить важные и практически значимые задачи моделирования быстропротекающих физических процессов. Положенный в основу программного пакета подход позволит детальнее охватить все особенности моделирования нескольких актуальных задач взаимодействия лазерного излучения с веществом. В рамках проекта планируется решить следующие задачи:

(А) Исследовать механизм образования больших отверстий в тонкой металлической пленке под действием индуцированной фемтосекундным лазером ударной волны. Тонкие пленки на подложках -- важный класс мишеней для нано-модификации поверхностей в целом ряде приложений. Интерес представляют эксперименты по исследованию формирования поверхностных наноструктур при облучении таких пленок, и в частности, влиянию вложенной энергии на размер и характер возникающих структур. Так, начиная с определенного энергетического порога, структуры куполообразной формы (bumps) переходят в струи (jets). Если энергию повышать еще больше, в экспериментах с золотыми и серебряными пленками наблюдаются отверстия, причем их размеры существенно превышают размер пятна. Такие размеры недостижимы при чисто тепловом механизме возникновения отверстий, поэтому возникла гипотеза о его механической, ударно-волновой природе. Эта гипотеза подтвердилась расчетами, и действительно, причиной возникновения отверстий является возникающая вследствие лазерного нагрева пленки ударная волна в стеклянной подложке.

(В) Исследовать лазерное ударное упрочнение подповерхностного слоя сплошной металлической мишени. Технологии ударного упрочнения, например, наклепа, известны уже очень давно. Оказывается, ударная волна, индуцированная лазерным излучением, также способна вызывать упрочняющий эффект. Металлические детали, обработанные на установках для упрочнения, демонстрируют лучшие прочностные свойства, а именно, лучше сопротивляются коррозии, усталостным нагрузкам, образованию трещин. Лазерное ударное упрочнение, согласно данным компании LSP Technologies, способно в несколько раз продлить срок жизни, например, турбинных лопаток или лопастей в двигателях у самолетов. Особенностью фемтосекундного лазерного ударного упрочнения является более высокая плотность энергии излучения, из-за чего индуцированные лазером ударные волны, вызывающие упрочнение, становятся короче и имеют в начальный момент времени большую амплитуду.

(С) Исследовать плавление и ударного сжатия порошков с помощью лазеров. Практически значимой является проблема плавления и ударного сжатия порошков с помощью лазеров. Значимость связана с новейшими технологиями трехмерной печати изделий. Как известно, при применении такого рода технологий намного упрощается процесс производства топологически сложных трехмерных конструкций. Будет проведен анализ плавления/рекристаллизации при ударном воздействии на порошки микро- и нано- частиц лазерным импульсом. Это важная новая тематика, которая мало изучена в отношении создания физических моделей и кодов для анализа происходящих процессов.

(D) Исследовать абляцию металлической мишени структурированным лазерным пучком. С помощью структурированных воздействий изготавливают объекты сложнейшей геометрии. Такими объектами наполняют метаповерхности, которые, например, уже применяются в качестве чрезвычайно высокочувствительных (определяют вещество при разбавлении до фемтомолей) химических датчиков SERS (surface enhanced Raman spectroscopy). Одним из основных приложений структурированных пучков является фабрикация поверхностных структур. При этом построение физико-метаматематической модели взаимодействия структурированного пучка с мишенью до сих пор является важной и актуальной задачей..

Рассматриваемые задачи имеют важное применение в технологиях лазерного ударного упрочнения, плазмонике,

микро- и наноэлектронике, технологиях 3D-печати, метаповерхностях и в других высокотехнических областях.

#### *на английском языке*

The complexity and complexity of the problems of interaction of laser radiation with matter challenges one of the most effective ways to solve them, namely, numerical modeling. Currently, there are no application software packages that combine the capabilities of hydrodynamic and molecular dynamic modeling. Well-known software products such as ABAQUS or LS-DYNA, which are used in modeling laser problems, use a continuum approach without offering atomistic components. Molecular dynamic codes, such as, for example, LAMMPS, in turn, work only with discrete particle systems, not having hydrodynamic models in their arsenal. Therefore, it is now highly relevant to create a software package that would allow combining continuous hydrodynamic and discrete molecular dynamic approaches for modeling problems of interaction of laser radiation with metals. Within the framework of this project, the Laser Problem Solver (LPS) software product will be created, with the help of which it is planned to solve important and practically significant tasks of modeling fast-flowing physical processes. The approach based on the software package will make it possible to cover in more detail all the features of modeling several actual problems of interaction of laser radiation with matter. Within the framework of the project, it is planned to solve the following problems:

(A) To investigate the mechanism of the formation of large holes in a thin metal film under the action of a femtosecond laser-induced shock wave. Thin films on substrates are an important class of targets for nano-modification of surfaces in a number of applications. Of interest are experiments to study the formation of surface nanostructures under irradiation of such films, and in particular, the effect of the energy invested on the size and nature of the resulting structures. So, starting from a certain energy threshold, dome-shaped structures (bumps) turn into jets (jets). If the energy is increased even more, holes are observed in experiments with gold and silver films, and their sizes significantly exceed the size of the spot. Such dimensions are unattainable with a purely thermal mechanism of the occurrence of holes, so a hypothesis arose about its mechanical, shock-wave nature. This hypothesis was confirmed by calculations, and indeed, the cause of the holes is the shock wave in the glass substrate resulting from laser heating of the film.

(B) To investigate laser shock hardening of the subsurface layer of a solid metal target. Impact hardening technologies, for example, riveting, have been known for a very long time. It turns out that the shock wave induced by laser radiation is also capable of causing a strengthening effect. Metal parts processed at hardening plants demonstrate better strength properties, namely, they resist corrosion, fatigue loads, and crack formation better. Laser shock hardening, according to LSP Technologies, is able to extend the life of, for example, turbine blades or blades in aircraft engines several times. A feature of femtosecond laser shock hardening is a higher radiation energy density, which is why laser-induced shock waves that cause hardening become shorter and have a large amplitude at the initial moment of time.

(C) Investigating the melting and shock compression of powders using lasers. The problem of melting and shock compression of powders using lasers is practically significant. The significance is connected with the latest technologies of three-dimensional printing of products. As you know, when using this kind of technology, the production process of topologically complex three-dimensional structures is much simplified. Will be the analysis of melting/recrystallization under impact on powders of micro- and nano-particles by laser pulse is carried out. This is an important new topic that has been little studied in relation to the creation of physical models and codes for the analysis of ongoing processes.

(D) To investigate the ablation of a metal target by a structured laser beam. With the help of structured influences, objects of the most complex geometry are made. Such objects are filled with metasurfaces, which, for example, are already used in as extremely highly sensitive (the substance is determined when diluted to femtomoles) chemical sensors SERS (surface enhanced Raman spectroscopy). One of the main applications of structured beams is the fabrication of surface structures. At the same time, the construction of a physico-metamaterial model of the interaction of a structured beam with a target is still an important and urgent task.

The problems under consideration have important applications in laser shock hardening technologies, plasmonics, micro- and nanoelectronics, 3D printing technologies, metasurfaces and other highly technical fields.

#### **4.2. Научная значимость и актуальность решения обозначенной проблемы**

##### *на русском языке*

Рассматриваемые задачи по взаимодействию ультракороткого лазерного излучения с металлами обладают высокой научной и практической значимостью.

Задача (А) об образовании отверстий в тонких металлических пленках в результате облучения фемтосекундным лазерным импульсом имеет приложения в микроэлектронике, сенсорике, индустрии чипов.

Задача (В) об упрочняющем ультракоротком лазерном воздействии важна для целых отраслей промышленности,

сталкивающимися с износом металлических деталей. В частности, в авиа- и турбиностроении технологии лазерного ударного упрочнения согласно данным компании LSP Technologies позволяют продлевать в несколько раз срок службы рабочих деталей, существенно сокращая тем самым производственные затраты.

Важность задачи (C) о спекании микро- и нанопорошков диктуется стремительным развитием как в РФ, так и за рубежом технологий трехмерной печати, и пока еще относительно неглубоким физическим пониманием фундаментальных механизмов этих процессов. Создание детализированных физико-математических подходов к этой важнейшей современной технологической области может позволить улучшить качество имеющихся технологических цепочек и дать базу для разработки принципиально новых промышленных стандартов.

Задача (D) об облучении металлов структурированными пучками относится к будущему лазерной индустрии, позволяя создавать поверхностные структуры огромной геометрической сложности. Точные модели абляции структурированными пучками позволят расширить уже имеющиеся приложения технологии в первую очередь в метаповерхностях, в оптической индустрии, например при изготовлении химических датчиков SERS (surface enhanced Raman spectroscopy).

Преимуществом предлагаемого пакета является возможность согласованного применения дополняющих друг друга континуального гидродинамического и дискретного атомистического подходов к моделированию для одной и той же физической задачи. Комбинированная методика исследования указанных явлений позволит не только развить аналитическую теорию данных явлений, но и проникнуть глубже в суть рассматриваемых процессов, а также усилит научный арсенал исследователя области знания и технологии, лежащих на стыке современной лазерной тематики и металловедения. Также важной особенностью является использование уравнений состояния вещества и потенциалов межатомного взаимодействия для широкого спектра металлов.

#### *на английском языке*

The problems under consideration on the interaction of ultrashort laser radiation with metals have high scientific and practical significance.

Problem (A) of the formation of holes in thin metal films as a result of irradiation with a femtosecond laser pulse has applications in microelectronics, sensors, and the chip industry.

Problem (B) on strengthening ultrashort laser exposure is important for entire industries facing wear of metal parts. In particular, in aircraft and turbine engineering, laser impact hardening technologies, according to LSP Technologies, allow extending the service life of working parts several times, thereby significantly reducing production costs.

Importance of Problem (C) of sintering micro- and nanopowders is dictated by the rapid development of three-dimensional printing technologies both in the Russian Federation and abroad, and a relatively shallow physical understanding of the fundamental mechanisms of these processes. The creation of detailed physical and mathematical approaches to this most important modern technological field can improve the quality of existing technological chains and provide a basis for the development of fundamentally new industrial standards.

Problem (D) of irradiating metals with structured beams relates to the future of the laser industry, allowing the creation of surface structures of enormous geometric complexity. Accurate models of structured beam ablation will allow expanding existing applications of the technology, primarily in metasurfaces, in the optical industry, for example, in the manufacture of chemical sensors SERS (surface enhanced Raman spectroscopy).

The combined methodology of the study of these phenomena will allow not only to develop an analytical theory of these phenomena, but also to penetrate deeper into the essence of the processes under consideration, and also strengthen the scientific arsenal of the researcher in the field of knowledge and technology lying at the junction of modern laser subjects and metal science.

### **4.3. Конкретная задача (задачи) в рамках проблемы, на решение которой направлен проект, ее масштаб и комплексность**

#### *на русском языке*

(A) Задача об исследовании ударно-волнового механизма образования отверстий при фемтосекундном лазерном облучении тонкой пленки, напыленной на стекло. В зависимости от вложенной энергии при облучении мишени лазерным импульсом могут образовываться различные поверхностные структуры. В зависимости от величины энергии это могут быть купола (bumps) и струи (jets). При дальнейшем увеличении вложенной энергии плавление пленки и ударно-волновые процессы, связанные с подложкой приводят к отрыву части металла от стекла и образованию

отверстия в облучаемой области металла, причем величина отверстий может в несколько раз превышать ширину пучка, что свидетельствует об особом механизме их образования, не связанным только лишь с процессом плавления. В действительности послойный отрыв металла и образование отверстий происходит в связи с распространением ударной волны в подложке и ее действием на границу пленки и подложки. Гидродинамическое и молекулярно-динамическое моделирование на примере золотой пленки и подложки из лабораторного стекла позволят получить детализированное описание этого механизма и получить зависимость размера отверстия от вложенной энергии при различных начальных конфигурациях.

(В) Задача о распространении и затухании индуцированной фемтосекундным лазером ударной волны в объемной лазерной мишени имеет важное приложение в технологии лазерного ударного упрочнения. Рассматривается уже сгенерированный профиль волны сжатия, возникший в результате облучения сплошной алюминиевой мишени при нормальных условиях, где уже завершились двухтемпературные процессы. Возникший профиль сжатия распространяется сначала в одномерном плоском режиме вглубь вещества, однако постепенно волна сферизуется и за промежуток времени в несколько десятков пикосекунд становится практически полностью полусферической. Амплитуда волны практически не меняется на первом, плоском этапе распространения, но сильно падает при ее сферизации. Гидродинамическое и молекулярно-динамическое моделирование процесса распространения и затухания волны позволит определить количественные пространственные и временные зависимости напряжений в металле, сопровождающие переход и затухание, и по этим зависимостям определить геометрию и размер области, в которой индуцированное лазером ударно-волновое воздействие вызывает упрочнение подповерхностного слоя мишени.

(С) Практически значимой является проблема плавления и ударного сжатия порошков с помощью лазеров. Будет проведено численное исследование термических и механических свойств среды, которую формирует множество примыкающих друг к другу сферических областей, деформирующихся и плавящихся в результате лазерного нагрева и ударного сжатия. Рассматривается одномерная цепочка и двумерная система примыкающих друг к другу сферических гранул, подвергаемая лазерному нагреву с одной стороны. Особое внимание будет уделено характерным для первых нескольких пикосекунд нагрева двухтемпературным процессам в мишени: поглощению излучения, нагреву электронной подсистемы, перераспределению энергии за счет электронной теплопроводности и электронно-решеточной релаксации. Также будет рассмотрена релаксация и распространение по гранулярной среде сформированного профиля сжатия. Этот процесс является однотемпературным. Будет проведен анализ плавления/рекристаллизации при ударном воздействии на порошки микро- и нано- частиц лазерным импульсом, определены формы, размеры и динамика границ зон плавления и рекристаллизации в процессе. Будут определены эффективные макроскопические двухтемпературные коэффициенты теплопроводности для одномерной и двумерной систем гранул как для сплошных сред.

(D) Численно исследуется абляция сплошной металлической мишени под воздействием структурированного не-гауссового лазерного пучка. Область нагрева в этом случае имеет, в отличие от гауссовых импульсов, форму кольца. Будут проанализированы двухтемпературные эффекты лазерной абляции мишени, а также форма и размер возникающих в результате воздействия поверхностных структур сложной формы. К двухтемпературным эффектам относится лазерный нагрев электронной подсистемы вещества, перераспределение и релаксация энергии нагретых электронов. Двухтемпературная часть важна, поскольку она не только оказывает определяющее воздействие на форму и размер поверхностных наноструктур, но и формирует нелинейный профиль сжатия большой амплитуды, который потом релаксируется вглубь мишени, оказывая ударно-сжимающее воздействие на нее.

#### *на английском языке*

(A) The problem of studying the shock-wave mechanism of hole formation during femtosecond laser irradiation of a thin film sprayed on glass. Depending on the energy invested, various surface structures can form when the target is irradiated with a laser pulse. Depending on the amount of energy, these can be domes (bumps) and jets (jets). With a further increase in the invested energy, the melting of the film and shock-wave processes associated with the substrate lead to the separation of a part of the metal from the glass and the formation of a hole in the irradiated area of the metal, and the size of the holes can be several times larger than the beam width, which indicates a special mechanism of their formation, not related only to the melting process. In fact, the layer-by-layer separation of metal and the formation of holes occurs due to the propagation of a shock wave in the substrate and its effect on the boundary of the film and the substrate. Hydrodynamic and molecular dynamic modeling using the example of a gold film and a substrate made of laboratory glass will allow us to obtain a

detailed description of this mechanism and to obtain the dependence of the hole size on the energy invested at various initial configurations.

(B) The problem of propagation and attenuation of a femtosecond laser-induced shock wave in a volumetric laser target has an important application in laser shock hardening technology. The already generated compression wave profile resulting from irradiation of a solid aluminum target under normal conditions, where two-temperature processes have already been completed, is considered. The resulting compression profile propagates first in a one-dimensional plane mode deep into the substance, but gradually the wave becomes spherical and becomes almost completely hemispherical over a period of several tens of picoseconds. The amplitude of the wave practically does not change at the first, flat stage of propagation, but it drops significantly during its spherization. Hydrodynamic and molecular dynamic modeling of the wave propagation and attenuation process will allow us to determine the quantitative spatial and temporal dependences of stresses in the metal accompanying the transition and attenuation, and from these dependences to determine the geometry and size of the region in which the laser-induced shock wave action causes hardening of the subsurface layer of the target.

(C) The problem of melting and shock compression of powders using lasers is practically significant. A numerical study of the thermal and mechanical properties of the medium, which is formed by a set of adjacent spherical areas deformed and melting as a result of laser heating and shock compression, will be carried out. A one-dimensional chain and a two-dimensional system of spherical granules adjacent to each other, subjected to laser heating on one side, are considered. Special attention will be paid to the two-temperature processes characteristic of the first few picoseconds of heating in the target: radiation absorption, heating of the electronic subsystem, energy redistribution due to electronic thermal conductivity and electron-lattice relaxation. Relaxation and propagation of the formed compression profile through the granular medium will also be considered. This process is single-temperature. The melting/recrystallization analysis will be carried out under the impact of a laser pulse on micro- and nano-particle powders, the shapes, sizes and dynamics of the boundaries of the melting and recrystallization zones in the process will be determined. Effective macroscopic two-temperature thermal conductivity coefficients will be determined for one-dimensional and two-dimensional systems of granules as for continuous media.

(D) The ablation of a solid metal target under the influence of a structured non-Gaussian laser beam is numerically investigated. The heating region in this case has, unlike Gaussian pulses, the shape of a ring. The two-temperature effects of laser ablation of the target will be analyzed, as well as the shape and size of complex surface structures resulting from exposure. Two-temperature effects include laser heating of the electronic subsystem of matter, redistribution and relaxation of the energy of heated electrons. The two-temperature part is important because it not only has a determining effect on the shape and size of surface nanostructures, but also forms a nonlinear compression profile of large amplitude, which then relaxes deep into the target, exerting a shock-compressive effect on it.

#### **4.4. Научная новизна исследований, обоснование достижимости решения поставленной задачи (задач) и возможности получения предполагаемых результатов**

*на русском языке*

Программный пакет Laser Problem Solver (LPS) будет являться первым комбинированным кодом, предоставляющим пользователю возможность одновременного использования гидродинамики и молекулярной динамики. Пакет задействует современные расчетные методики и программные компоненты.

В эйлеровом гидродинамическом программной блоке будут использоваться расчетные схемы, основанные на римановских солверах HLL и HLLC, удобные для работы с неидеальными уравнениями состояния. Схемы на основе солвера HLLC отличаются робастностью и высокой точностью разрешения движущихся разрывов, сравнимой с солвером Roe. Порядок повышается с помощью реконструкций ENO и MUSCL.

Также в гидродинамическом блоке будет задействован разработанный и постоянно улучшаемый сотрудниками научного коллектива проекта трехмерный гидродинамический код SPH (smoothed particle hydrodynamics). Это код, основанный на подходе со сглаженными частицами. В ней применяется массивное распараллеливание для работы на системах с распределенной памятью. Вычислительный код предназначен для решения трехмерных задач гидродинамики в экстремальных условиях. Эти условия соответствуют моделированию ударных и детонационных волн в конденсированных и газовых средах. В текущей версии кода имеется необходимый набор средств для реализации начального этапа проекта, а именно необходимые математические модели.

Молекулярно-динамический программный блок основан на высокопроизводительных параллельных программных компонентах. Он использует доменную декомпозицию материала с помощью ячеек Вороного, что позволяет

поддерживать хороший баланс нагрузки на процессор даже при фрагментации образца, приводящей к образованию газа, полостей и струй. Для описания взаимодействия между атомами будет использоваться EAM-потенциал, разработанный с помощью метода согласования напряжений (stress matching method). Параметры потенциала подстраиваются на основе DFT-расчетов.

Задача (А) об исследовании механизма образования больших отверстий в тонкой металлической пленке под действием индуцированной фемтосекундным лазером ударной волны имеет важные приложения в сенсорике, микро- и наноэлектронике.

Задача (В) о численном исследовании наблюдающихся в экспериментах явлений лазерного ударного упрочнения подповерхностного слоя сплошной металлической мишени позволяет развить новую, еще только появляющуюся в нашей стране технологию, позволяющую эффективно бороться с проблемами износа металлических деталей в различных отраслях промышленности, особенно в случае коррозии, усталостных нагрузок, образования трещин. Экономический эффект от данной технологии, согласно данным компании LSP Technologies, является существенным. Задача (С) об исследовании плавления и ударного сжатия порошков с помощью лазеров дает возможность эффективнее использовать текущие подходы и установки, а также конструировать новые методики в рамках современной, актуальной и важной в последние годы темы аддитивных технологий.

Задача (D) об абляции металлической мишени структурированным лазерным пучком, также иногда называемым вихревым пучком относится к будущему лазерной индустрии, уже сейчас имея высокотехнологичные приложения в индустрии наноповерхностей и фабрикации сверхчувствительных химических датчиков.

Преимуществом пакета является возможность согласованного применения дополняющих друг друга континуального гидродинамического и дискретного атомистического подходов к моделированию для одной и той же физической задачи. Также важной особенностью является использование уравнений состояния вещества и потенциалов межатомного взаимодействия для широкого спектра металлов.

Научная новизна проекта определяется тем, что в ходе его реализации будет дано объяснение новым открытым в последние десятилетия эффектам действия индуцированных лазером ударных волн на металлы с использованием детального численного моделирования, основанного на потенциалах межатомного взаимодействия и реальных широкодиапазонных уравнениях состояния вещества.

Авторы проекта обладают значительным опытом математического моделирования задач механики сплошных сред и задач молекулярной динамики, в том числе с использованием многопроцессорной вычислительной техники.

Обоснование достижимости запланированных результатов проекта связано с анализом современных тенденций в области математического моделирования, а также опытом и квалификацией авторов проекта. В то же время, коллектив включает в себя значительно число молодых исследователей, что позволяет рассчитывать на интенсивную работу по развитию имеющегося инструментария.

#### *на английском языке*

The Laser Problem Solver (LPS) software package will be the first combined code that provides the user with the possibility of simultaneous use of hydrodynamics and molecular dynamics. The package uses modern calculation methods and software components.

The Eulerian hydrodynamic program block will use computational schemes based on Riemannian solvers HLL and HLLC, convenient for working with non-ideal equations of state. Schemes based on the HLLC solver are characterized by robustness and high resolution accuracy of moving discontinuities, comparable to the Roe solver. The order is increased by ENO and MUSCL reconstructions..

Also, the hydrodynamic block will involve a three-dimensional hydrodynamic code SPH (smoothed particle hydrodynamics) developed and constantly improved by the staff of the project's research team. This is a code based on a smoothed particle approach. It uses massive parallelization to work on distributed memory systems. The computational code is designed to solve three-dimensional problems of hydrodynamics in extreme conditions. These conditions correspond to the simulation of shock and detonation waves in condensed and gaseous media. The current version of the code has the necessary set of tools for the implementation of the initial stage of the project, namely the necessary mathematical models.

The molecular dynamic software unit is based on high-performance parallel software components. It uses a domain decomposition of the material using Voronoi cells, which allows maintaining a good load balance on the processor even when the sample is fragmented, leading to the formation of gas, cavities and jets. To describe the interaction between atoms, the EAM potential will be used, developed using the stress matching method. The potential parameters are adjusted based on DFT calculations.

Task (A) on the study of the mechanism of the formation of large holes in a thin metal film under the action of a femtosecond laser-induced shock wave has important applications in sensorics, micro- and nanoelectronics.

Task (B) on the numerical study of the phenomena of laser shock hardening of the subsurface layer of a solid metal target

observed in experiments allows us to develop a new technology that is just emerging in our country, which makes it possible to effectively combat the problems of wear of metal parts in various industries, especially in the case of corrosion, fatigue loads, crack formation. The economic effect of this technology, according to LSP Technologies, is significant.

Task (C) on the study of melting and shock compression of powders using lasers makes it possible to use current approaches and installations more efficiently, as well as to design new techniques within the framework of the modern, relevant and important topic of additive technologies in recent years.

The task (D) of ablating a metal target with a structured laser beam, also sometimes called a vortex beam, refers to the future of the laser industry, already having high-tech applications in the nanosurface industry and the fabrication of ultra-sensitive chemical sensors.

The advantage of the package is the possibility of a coordinated application of complementary continuous hydrodynamic and discrete atomistic approaches to modeling for the same physical problem. Another important feature is the use of equations of state of matter and interatomic interaction potentials for a wide range of metals.

The scientific novelty of the project is determined by the fact that in the course of its implementation, an explanation will be given for the effects of laser-induced shock waves on metals discovered in recent decades using detailed numerical modeling based on the potentials of interatomic interaction and real wide-range equations of state of matter.

The authors of the project have considerable experience in mathematical modeling of continuum mechanics and molecular dynamics problems, including using multiprocessor computing technology. The justification of the achievability of the planned results of the project is related to the analysis of current trends in the field of mathematical modeling, as well as the experience and qualifications of the authors of the project. At the same time, the team includes a significant number of young researchers, which allows us to count on intensive work on the development of existing tools.

#### **4.5. Современное состояние исследований по данной проблеме, основные направления исследований в мировой науке и научные конкуренты**

*на русском языке*

Основные направления исследований в моделировании взаимодействия лазерного излучения и вещества, относящиеся к тематике на данный момент:

- моделирование лазерной абляции в связи с результирующим структурированием поверхности и исследование образовавшихся структур, как в случае периодических поверхностных структур, индуцированных лазером (LIPSS), хаотических структур либо образовании бампов, струй, отверстий в случае тонких мишеней;
- моделирование индуцированных лазером ударных волн для промышленных приложений, в частности, для лазерного ударного упрочнения и абляции в жидкость;
- моделирование эффектов абляции в тонких металлических пленках, в том числе, напыленных на стеклянные подложки.

В последние десятилетия существует несколько научных групп, специализирующихся на моделировании взаимодействия лазерного излучения с веществом и лазерно-индуцированных ударных волн в интересующем нас ключе, и также действующих инструменты численного моделирования в своих исследованиях.

Группа профессора Ж.-Ф. Коломбье (Франция, США) исследует задачи исследования наноструктурирования поверхностей, в особенности LIPSS, делая акцент на сопутствующих электромагнитных явлениях и решая уравнения Максвелла для распространяющегося излучения. Также группа использует гидродинамические модели, основанные на конечно-разностном подходе.

Группа профессора Л. Жигилея (США) специализируется на задачах абляции и образовании поверхностных структур в металлах и изучении их свойств с применением в материаловедении. Основным инструментом численного моделирования группы: молекулярная динамика, на которой специализируется сам профессор.

Распределенная международная группа М. Поварницына с коллегами, включающая специалистов из Франции и России. Группа начала работу еще в конце прошлого века в стенах ОИВТ РАН в Москве, где до сих пор работает К.В. Хищенко. Они используют для моделирования воздействия лазера на металлы гидродинамические коды с подробными феноменологическими вставками, например, для моделирования кинетики неравновесных явлений при фронтальном отколе. Сильной стороной коллектива является использование широкодиапазонных полуэмпирических многофазных табличных уравнений состояния, охватывающих существенную часть фазовой диаграммы вещества при моделировании.

Группа экспериментаторов из Осаки, Япония под руководством Т. Сано уже более 10 лет проводит эксперименты по лазерному ударному упрочнению с целью повышения прочностных свойств металлов, например, стенок ядерных реакторов. Для численного моделирования группа использует коммерческие гидродинамические вычислительные коды.

Группа экспериментаторов из ОИВТ РАН под руководством профессора М.Б. Аграната, занимается экспериментальным исследованием лазерного упрочнения металлов, исследуя алюминиевые и титановые образцы.

Подходы перечисленных групп характеризуются либо использованием только молекулярно-динамического подхода к расчетам, со свойственными ему ограничениями, либо использование только одномерных/двумерных гидродинамических кодов с кинетическими вставками для исследования явлений разрушения. У групп, ориентированных на промышленность и технологии преобладает подход с использованием конечно-элементных коммерческих кодов (ABAQUS, LS-DYNA) и расчетами инженерного характера. В этой области есть нехватка публикаций с рациональной и точной постановкой. К примеру, в работах по лазерному пинингу моделирование чаще всего происходит на уровне отслеживания различий в паттернах выстрелов лазером в поверхность, даже в случае расчетов с моделями разрушения.

Авторами проекта используются современные вычислительные подходы и инструментарий. Разработкой межатомных потенциалов занимается В.В. Жаховский, являющийся признанным специалистом в этом вопросе. Уравнения состояния предоставляются ведущими специалистами мирового уровня: К.В. Хищенко из ОИВТ РАН и И.В. Ломоносовым из ИПХФ РАН. В рамках проекта авторы планируют создать и развивать уникальный вычислительный подход, не имеющий прямых мировых аналогов, и способный исчерпывающим образом промоделировать и рассмотреть важнейшие физические эффекты в современных и трендовых областях науки и технологий.

#### *на английском языке*

The main directions of research in modeling the interaction of laser radiation and matter related to the topic at the moment:

- modeling of laser ablation in connection with the resulting surface structuring and the study of the structures formed, as in the case of periodic laser-induced surface structures (LIPSS), chaotic structures or the formation of bumps, jets, holes in the case of thin targets;
- modeling of laser-induced shock waves for industrial applications, in particular, for laser shock hardening and ablation into liquid;
- modeling of ablation effects in thin metal films, including those deposited on glass substrates.

In recent decades, there have been several scientific groups specializing in modeling the interaction of laser radiation with matter and laser-induced shock waves in the key we are interested in, and also using numerical modeling tools in their research.

The group of Professor J.-F. Colombier (France, USA) investigates the problems of nanostructuring of surfaces, especially LIPSS, focusing on concomitant electromagnetic phenomena and solving Maxwell's equations for propagating radiation. The group also uses hydrodynamic models based on a finite-difference approach.

The group of Professor L. Zighilev (USA) specializes in the problems of ablation and the formation of surface structures in metals and the study of their properties with application in materials science. The main tool for numerical modeling of the group is molecular dynamics, which the professor himself specializes in.

M. Povarnitsyn's distributed international group with colleagues, including specialists from France and Russia. The group began work at the end of the last century in the walls of the Institute of the Russian Academy of Sciences in Moscow, where K.V. Predatenko still works. They use hydrodynamic codes with detailed phenomenological inserts to simulate the effect of a laser on metals, for example, to simulate the kinetics of nonequilibrium phenomena during frontal breakaway. The strength of the team is the use of wide-range semi-empirical multiphase tabular equations of state, covering a significant part of the phase diagram of matter in modeling.

A group of experimenters from Osaka, Japan, led by T. Sano, has been conducting experiments on laser shock hardening for more than 10 years in order to increase the strength properties of metals, for example, the walls of nuclear reactors. For numerical simulation, the group uses commercial hydrodynamic computational codes.

A group of experimenters from the Research Institute of the Russian Academy of Sciences, led by Professor M.B. Agranat, is engaged in experimental research of laser hardening of metals, examining aluminum and titanium samples.

The approaches of these groups are characterized either by using only a molecular dynamic approach to calculations, with its inherent limitations, or by using only one-dimensional/two-dimensional hydrodynamic codes with kinetic inserts to study the phenomena of destruction. Groups focused on industry and technology have a predominant approach using finite element commercial codes (ABAQUS, LS-DYNA) and engineering calculations. There is a shortage of publications with rational and accurate formulation in this area. For example, in works on laser pinning, modeling most often occurs at the level of tracking differences in patterns of laser shots into the surface, even in the case of calculations with destruction models.

The authors of the project use modern computational approaches and tools. The development of interatomic potentials is carried out by V.V. Zhakhovsky, who is a recognized expert in this matter. The equations of state are provided by leading world-class experts: K.V. Predatenko from the Institute of Research and Development of the Russian Academy of Sciences



and I.V. Lomonosov from the IPHF RAS. Within the framework of the project, the authors plan to create and develop a unique computational approach that has no direct world analogues, and is able to comprehensively simulate and consider the most important physical effects in modern and trending fields of science and technology.

#### **4.6. Предлагаемые методы и подходы, общий план работы на весь срок выполнения проекта и ожидаемые результаты (объемом не менее 2 стр.; в том числе указываются ожидаемые конкретные результаты по годам; общий план дается с разбивкой по годам)**

*на русском языке*

В эйлеровом гидродинамическом программном блоке будут использоваться расчетные схемы, основанные на римановских солверах HLL и HLLC, удобные для работы с неидеальными уравнениями состояния. Схемы на основе солвера HLLC отличаются робастностью и высокой точностью разрешения движущихся разрывов, сравнимой с солвером Roe. Порядок повышается с помощью реконструкций ENO и MUSCL.

Также в гидродинамическом блоке будет задействован разработанный и постоянно улучшаемый сотрудниками научного коллектива проекта трехмерный гидродинамический код SPH (smoothed particle hydrodynamics). Это код, основанный на подходе со сглаженными частицами. В ней применяется массивное распараллеливание для работы на системах с распределенной памятью. Вычислительный код предназначен для решения трехмерных задач гидродинамики в экстремальных условиях. Эти условия соответствуют моделированию ударных и детонационных волн в конденсированных и газовых средах. В текущей версии кода имеется необходимый набор средств для реализации начального этапа проекта, а именно необходимые математические модели.

Молекулярно-динамический программный блок основан на высокопроизводительных параллельных программных компонентах. Он использует доменную декомпозицию материала с помощью ячеек Вороного, что позволяет поддерживать хороший баланс нагрузки на процессор даже при фрагментации образца, приводящей к образованию газа, полостей и струй. Для описания взаимодействия между атомами будет использоваться EAM-потенциал, разработанный с помощью метода согласования напряжений (stress matching method). Параметры потенциала подстраиваются на основе DFT-расчетов.

Общий план на весь срок выполнения проекта:

Первый год

1) Планируется провести в двумерной постановке численное исследование характера структуры поверхностного слоя мишеней из алюминия при варьировании энергии и длительности одиночных ультракоротких лазерных импульсов. Для молекулярно-динамических расчетов будет проведен подбор и калибровка потенциалов межатомного взаимодействия для алюминия. Для гидродинамических расчетов будет произведен подбор параметров уравнения состояния (УРС) алюминия в форме Ми-Грюнайзена для металлов, а также сравнение калибровочных расчетов для различных параметров УРС Ми-Грюнайзена. В качестве тестовой задачи будут использованы типовые тестовые задачи о распаде произвольного разрыва.

2) Планируется провести в двумерной постановке численное моделирование фемтосекундной абляции тонкопленочной мишени, напыленной на стеклянную подложку. Результаты будут сравнены с данными натурального эксперимента, в котором толщина пленки составляет около 50 нм, а толщина подложки имеет микронный масштаб. Будет исследовано образование сквозных отверстий в пленке в процессе ее послойной деляминации от подложки, а также оценен размер образовавшегося отверстия в зависимости от величины энергии лазерного импульса и радиуса пучка.

3) Планируется подготовить модели теплопроводности гранулированных сред для моделирования спекания порошков. Будут адаптированы коды SPH и молекулярно-динамический код с учетом теплопроводности с помощью блока Монте-Карло внутри молекулярно-динамической программы. Будет решена задача о потоке тепла от стационарного движущегося лазерного источника, и о потоке тепла и волн давления от импульсного источника.

Второй год

1) Планируется провести в двумерной постановке численное исследование характера структуры поверхностного слоя мишеней из алюминия при варьировании энергии и длительности одиночных ультракоротких лазерных импульсов с полуэмпирическим широкодиапазонным УРС, разрабатываемые в ОИВТ РАН и ИПХФ РАН. Процессы, происходящие в металле после прохождения ударной волны, инициированные ударно-волновой нагрузкой, будут проанализированы с помощью конечно-элементного кода ABAQUS. Эти процессы способствуют упрочнению и важны для точных расчетов степени упрочнения металла. В результате будут получены поля остаточных деформаций, которые будут сравнены с данными натуральных экспериментов.

- 2) Планируется провести в двумерной постановке численное моделирование фемтосекундной абляции тонкопленочной мишени, напыленной на стеклянную подложку с полуэмпирическим широкодиапазонным УРС. Результаты будут сравнены с данными натурального эксперимента, в котором толщина пленки составляет около 50 нм, а толщина подложки имеет микронный масштаб. Будет исследовано образование отверстий на тыльной стороне пленки в процессе ее послойной деламинации от подложки, а также оценен их размер в зависимости от вложенной энергии.
- 3) Планируется провести в трехмерной постановке гидродинамическое моделирование абляции сплошной и пленочной мишени на подложке мишени негауссовым импульсом с кольцевидной формой светового пятна и импульсом общего вида без аксиальной симметрии. Будет проанализирован процесс действия неструктурированного пучка на мишень, и выделены отличия при воздействии структурированных пучков разной длительности импульса на разные мишени. Будут изучены два вида импульсов: фемтосекундный и наносекундный.
- 4) Планируется уточнение физических моделей поглощения излучения гранулированной средой (порошком) и теплопроводности гранулированной среды. Выяснение судьбы паровых полостей, остающихся в расплаве. Анализ влияния процессов теплоотвода на кинетику кристаллизации. Продолжение численных гидродинамических и молекулярно-динамических расчетов с внесенными в них уточненными физическими моделями.
- 5) Разработка параллельной версии для двумерной гидродинамической части пакета программ.

Третий год

- 1) Разработка параллельной версии трехмерной гидродинамической части пакета программ.
- 2) Доведение пакета до полноценного форматного IT продукта, готового к распространению и использованию сторонними пользователями.

#### *на английском языке*

The Eulerian hydrodynamic program block will use computational schemes based on Riemannian solvers HLL and HLLC, convenient for working with non-ideal equations of state. Schemes based on the HLLC solver are characterized by robustness and high resolution accuracy of moving discontinuities, comparable to the Roe solver. The order is increased by ENO and MUSCL reconstructions..

Also, the hydrodynamic block will involve a three-dimensional hydrodynamic code SPH (smoothed particle hydrodynamics) developed and constantly improved by the staff of the project's research team. This is a code based on a smoothed particle approach. It uses massive parallelization to work on distributed memory systems. The computational code is designed to solve three-dimensional problems of hydrodynamics in extreme conditions. These conditions correspond to the simulation of shock and detonation waves in condensed and gaseous media. The current version of the code has the necessary set of tools for the implementation of the initial stage of the project, namely the necessary mathematical models.

The molecular dynamic software unit is based on high-performance parallel software components. It uses a domain decomposition of the material using Voronoi cells, which allows maintaining a good load balance on the processor even when the sample is fragmented, leading to the formation of gas, cavities and jets. To describe the interaction between atoms, the EAM potential developed using the stress matching method will be used. The potential parameters are adjusted based on DFT calculations.

General plan for the entire duration of the project:

First year

- 1) It is planned to conduct a two-dimensional numerical study of the nature of the structure of the surface layer of aluminum targets with varying energy and duration of single ultrashort laser pulses. For molecular dynamic calculations, the selection and calibration of interatomic interaction potentials for aluminum will be carried out. For hydrodynamic calculations, the parameters of the equation of state (EOS) of aluminum in the form of Mi-Gruneisen for metals will be selected, as well as a comparison of calibration calculations for various parameters of Mie-Gruneisen URS. As a test problem, typical test problems on the decay of an arbitrary gap will be used.
- 2) Numerical simulation of femtosecond ablation of a thin-film target sprayed on a glass substrate is planned to be carried out in a two-dimensional formulation. The results will be compared with the data of a full-scale experiment in which the film thickness is about 50 nm, and the thickness of the substrate has a micron scale. The formation of through holes in the film during its layer-by-layer delamination from the substrate will be investigated, and the size of the hole formed will be estimated depending on the magnitude of the laser pulse energy and the beam radius.
- 3) It is planned to prepare models of the thermal conductivity of granular media for modeling the sintering of powders. The SPH codes and the molecular dynamic code will be adapted taking into account thermal conductivity using the Monte Carlo

block inside the molecular dynamic program. The problem of heat flow from a stationary moving laser source and the flow of heat and pressure waves from a pulsed source will be solved.

#### Second year

- 1) It is planned to conduct in a two-dimensional formulation a numerical study of the nature of the structure of the surface layer of aluminum targets with varying energy and duration of single ultrashort laser pulses with semi-empirical wide-range EOS, developed at the JIHT RAS and IPCF RAS. The processes occurring in the metal after the passage of the shock wave, initiated by the shock wave load, will be analyzed using the finite element code ABAQUS. These processes contribute to hardening and are important for accurate calculations of the degree of hardening of the metal. As a result, fields of residual deformations will be obtained, which will be compared with the data of field experiments.
- 2) It is planned to conduct numerical simulation of femtosecond ablation of a thin-film target sprayed on a glass substrate with a semi-empirical wide-range URS in a two-dimensional formulation. The results will be compared with the data of a full-scale experiment in which the film thickness is about 50 nm, and the thickness of the substrate has a micron scale. The formation of holes on the back side of the film during its layer-by-layer delamination from the substrate will be investigated, and their size will also be estimated depending on the energy invested.
- 3) It is planned to conduct a three-dimensional hydrodynamic simulation of ablation of a solid and film target on a target substrate by a non-Gaussian pulse with a ring-shaped light spot and a general-type pulse without axial symmetry. The process of action of an unstructured beam on a target will be analyzed, and differences in the effect of structured beams of different pulse durations on different targets will be highlighted. Two types of pulses will be studied: femtosecond and nanosecond.
- 4) It is planned to refine the physical models of radiation absorption by the granular medium (powder) and the thermal conductivity of the granular medium. Finding out the fate of the steam cavities remaining in the melt. Analysis of the influence of heat removal processes on the kinetics of crystallization. Continuation of numerical hydrodynamic and molecular dynamic calculations with updated physical models introduced into them.
- 5) Development of a parallel version for the two-dimensional hydrodynamic part of the software package.

#### Third year

- 1) Development of a parallel version of the three-dimensional hydrodynamic part of the software package.
- 2) Bringing the package to a full-fledged formatted IT product ready for distribution and use by third-party users.

#### **4.7. Имеющийся у научного коллектива научный задел по проекту, наличие опыта совместной реализации проектов (указываются полученные ранее результаты, разработанные программы и методы)**

Коллектив участников проекта обладает большим опытом в разработке пакетов программ, решающих задачи, описываемые гиперболическими системами уравнений. Руководитель проекта принимал участие в создании пакета прикладных программ Turbulence Problem Solver (TPS) [1-4], идейным вдохновителем которого был академик РАН Олег Михайлович Белоцерковский. Пакет успешно применялся при решении задач, в которых определяющую роль играют волновые процессы и развитие гидродинамической неустойчивости. Ключевой особенностью являлось эффективное использование параллельных вычислений, что являлось по тем временам революционным шагом. Молекулярно-динамический подход глубоко исследован основным исполнителем проекта В.В. Жаховским за последние три десятилетия, что подтверждено многочисленными публикациями, указанными в его анкете. Коллектив участников проекта имеет многочисленные совместные публикации, что позволяет надеяться на успешную реализацию проекта. [5-6].

В работах по изучению абляции объемных мишеней под действием ультракоротких лазерных импульсов выполнено молекулярно-динамическое моделирование процесса разлета нагретого лазерным импульсом алюминия с межатомным потенциалом взаимодействия, учитывающим многочастичные эффекты. Получена картина абляции с образованием откольной жидкой части мишени, заполненной двухфазной пеной из жидкости и пара [7-9]. В работах, проведенных научным коллективом, рассмотрено взаимодействие фемтосекундных лазерных импульсов с тонкими золотыми пленками на диэлектрической подложке из плавленого кварца. Изучена абляция таких мишеней в результате действия лазерных импульсов с длительностью 30-300 фс. Тепловые и механические свойства этих мишеней качественно отличаются от поведения объемных мишеней и от свободно висящих пленок, здесь подложка работает как теплоизолирующая стенка, замедляя охлаждение металла за счет теплопроводности в сравнении с ситуацией объемной мишени. В то же время гидромеханическое взаимодействие пленки с кварцем меняет ситуацию

по сравнению со случаем свободно висящей пленки.

С помощью молекулярно-динамического моделирования исследовано образование поверхностных наноструктур как результат абляции при действии ультракороткого лазерного излучения на металлические пленки. Изучена динамика тонкой пленки золота на стеклянной подложке, вызванная быстрым нагревом с использованием субпикосекундным лазерным импульсом. Волны давления, генерируемые таким нагревом, могут привести к отслаиванию пленки и ее отлету от подложки. Из-за неоднородности нагрева поверхности пленки в радиальном направлении лазерного пятна распределение скоростей в веществе пленки, улетающий от подложки, имеет максимум в центре пятна, и отделяющаяся пленка имеет куполообразную форму, раздувающуюся со временем (инфляционная стадия). Объем полости между пленкой и подложкой увеличивается во время инфляции, продолжающейся от нескольких до нескольких десятков наносекунд. Типичные скорости полета находятся в диапазоне 30-200 м/с.

Создана расчетная методика для решения гидродинамических и термомеханических задач, основанной на контактной модификации метода сглаженных частиц (SPH – smoothed particle hydrodynamics). Данная методика относится к семейству бессеточных лагранжевых методов, предназначенных для решения задач, в которых расчетная область претерпевает деформации. Развиваемая методика была успешно апробирована на тестовых и реальных прикладных задачах.

#### Список литературы

1. V. V. Shepelev, S.V. Fortova, Hydrodynamic simulation of laser-induced shock waves using the Turbulence Problem Solver software package, J. Phys.: Conf. Ser., 2057, 01208 (2021), <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012082>
2. V.V Shepelev, S.V. Fortova, E.I. Oparina, Application of Turbulence Problem Solver (TPS) software complex for numerical modeling of the interaction between laser radiation and metals. Computer Research and Modeling, 10:5 (2018), Pp. 619-630.
3. S.V. Fortova, P.S. Utkin and V.V. Shepelev, Application of software complex Turbo Problem Solver to Rayleigh-Taylor instability modeling, Journal of Physics: Conference Series, Volume 754, Number 1 (2016).
4. M. S. Belotserkovskaya, A. P. Pronina, S. V. Fortova, and V. V. Shepelev, "Application of the program package TURBO problem solver for some fluid dynamics problems," Comput. Math. Math. Phys. 56, 1162–1173 (2016).
5. V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovsky, Y.V. Petrov, V.V. Shepelev, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal, N.A. Inogamov, Dynamics of ruthenium mirror under action of soft x-ray ultrashort laser pulse, J. Phys.: Conf. Ser., 1147, 012070 (2019).
6. V.A. Khokhlov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, D.K. Ilnitsky, K.P. Migdal, V.V. Shepelev, Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation, AIP Conf. Proc, 1793, 100038 (2017).
7. В.В. Жаховский, Н.А. Иногамов, К. Nishihara, Новый механизм формирования нанорельефа поверхности, облучённой фемтосекундным лазерным импульсом Письма в ЖЭТФ, 87, 491-496, 2008
8. V.V. Zhakhovskii, N.A. Inogamov, K. Nishihara, Laser ablation and spallation of crystalline aluminum simulated by Molecular Dynamics, J. Phys.: Conf. Ser, 112, 042080, 2008
9. Н.А. Иногамов, В.В. Жаховский, С.И. Ашитков, Ю.В. Петров, М.Б. Агранат, С.И. Анисимов, К. Нишихара, В.Е. Фортов, О нанотолке после воздействия ультракороткого лазерного импульса, ЖЭТФ, 134, 5-28, 2008

#### **4.8. Перечень оборудования, материалов, информационных и других ресурсов, имеющихся у научного коллектива для выполнения проекта (в том числе – описывается необходимость их использования для реализации проекта)**

Для реализации проекта требуется наличие расчетного средства для проведения численных исследований, а также доступ к вычислительным ресурсам. Участники проекта обеспечены персональными компьютерами, SPH и МД моделирование осуществляется на нескольких многопроцессорных машинах, в том числе на кластере К-100 в ИПМ им.

М.В. Келдыша (960 выч.ядер), суперкомпьютере "Ломоносов" (МГУ). В.В.Жаховский имеет доступ на голландский национальный суперкомпьютер Cartesius (48 000 выч.ядер) <https://userinfo.surfsara.nl/systems/cartesius>. Используются оригинальные, разработанные участниками проекта программы: программа двухтемпературной гидродинамики, схема МД расчетов с оригинальной методикой распараллеливания, схема SPH и другие. Применяются вычислительные пакеты COMSOL, LS-DYNA, LAMMPS, Abinit и VASP (метод классической и квантовой молекулярной динамики), пакеты символических вычислений и др. Весь этот аппарат будет использоваться при выполнении проекта. Моделирование методами МД-МК и SPH основано на применении перечисленных выше суперкомпьютеров.

#### **4.9. План работы на первый год выполнения проекта (в том числе указываются запланированные командировки (экспедиции) по проекту)**

*на русском языке*

Первый год

- 1) Планируется провести в двумерной постановке численное исследование характера структуры поверхностного слоя мишеней из алюминия при варьировании энергии и длительности одиночных ультракоротких лазерных импульсов. Для молекулярно-динамических расчетов будет проведен подбор и калибровка потенциалов межатомного взаимодействия для алюминия. Для гидродинамических расчетов будет произведен подбор параметров уравнения состояния (УРС) алюминия в форме Ми-Грюнайзена для металлов, а также сравнение калибровочных расчетов для различных параметров УРС Ми-Грюнайзена. В качестве тестовой задачи будут использованы типовые тестовые задачи о распаде произвольного разрыва.
- 2) Планируется провести в двумерной постановке численное моделирование фемтосекундной абляции тонкопленочной мишени, напыленной на стеклянную подложку. Результаты будут сравнены с данными натурального эксперимента, в котором толщина пленки составляет около 50 нм, а толщина подложки имеет микронный масштаб. Будет исследовано образование сквозных отверстий в пленке в процессе ее послойной деламинации от подложки, а также оценен размер образовавшегося отверстия в зависимости от величины энергии лазерного импульса и радиуса пучка.
- 3) Планируется подготовить модели теплопроводности гранулированных сред для моделирования спекания порошков. Будут адаптированы коды SPH и молекулярно-динамический код с учетом теплопроводности с помощью блока Монте-Карло внутри молекулярно-динамической программы. Будет решена задача о потоке тепла от стационарного движущегося лазерного источника, и о потоке тепла и волн давления от импульсного источника.

*на английском языке*

First year

- 1) It is planned to conduct a two-dimensional numerical study of the nature of the structure of the surface layer of aluminum targets with varying energy and duration of single ultrashort laser pulses. For molecular dynamic calculations, the selection and calibration of interatomic interaction potentials for aluminum will be carried out. For hydrodynamic calculations, the parameters of the equation of state (EOS) of aluminum in the form of Mie-Gruneisen for metals will be selected, as well as a comparison of calibration calculations for various parameters of Mie-Gruneisen EOS. As a test problem, typical test problems on the decay of an arbitrary gap will be used.
- 2) Numerical simulation of femtosecond ablation of a thin-film target sprayed on a glass substrate is planned to be carried out in a two-dimensional formulation. The results will be compared with the data of a full-scale experiment in which the film thickness is about 50 nm, and the thickness of the substrate has a micron scale. The formation of through holes in the film during its layer-by-layer delamination from the substrate will be investigated, and the size of the hole formed will be estimated depending on the magnitude of the laser pulse energy and the beam radius.
- 3) It is planned to prepare models of the thermal conductivity of granular media for modeling the sintering of powders. The SPH codes and the molecular dynamic code will be adapted taking into account thermal conductivity using the Monte Carlo block inside the molecular dynamic program. The problem of heat flow from a stationary moving laser source and the flow of heat and pressure waves from a pulsed source will be solved.

#### **4.10. Планируемое на первый год содержание работы каждого основного исполнителя проекта (включая руководителя проекта)**

- 1) Планируется провести в двумерной постановке численное исследование характера структуры поверхностного слоя

мишеней из алюминия при варьировании энергии и длительности одиночных ультракоротких лазерных импульсов. (В.В. Шепелев, Д.К. Ильницкий, С.А. Дьячков, С.Ю. Григорьев, С.А. Мурзов) Для молекулярно-динамических расчетов будет проведен подбор и калибровка потенциалов межатомного взаимодействия для алюминия. (В.В. Жаховский, Е.А. Перов) Для гидродинамических расчетов будет произведен подбор параметров уравнения состояния (УРС) алюминия в форме Ми-Грюнайзена для металлов, а также сравнение калибровочных расчетов для различных параметров УРС Ми-Грюнайзена. (В.В. Шепелев, В.А. Хохлов). В качестве тестовой задачи будут использованы типовые тестовые задачи о распаде произвольного разрыва. (В.В. Шепелев, В.А. Хохлов)

2) Планируется провести в двумерной постановке численное моделирование фемтосекундной абляции тонкопленочной мишени, напыленной на стеклянную подложку. Результаты будут сравнены с данными натурального эксперимента, в котором толщина пленки составляет около 50 нм, а толщина подложки имеет микронный масштаб. Будет исследовано образование сквозных отверстий в пленке в процессе ее послойной деляминации от подложки, а также оценен размер образовавшегося отверстия в зависимости от величины энергии лазерного импульса и радиуса пучка. (В.В. Шепелев, В.В. Жаховский, Е.А. Перов, С.А. Дьячков, С.Ю. Григорьев, С.А. Мурзов)

3) Планируется подготовить модели теплопроводности гранулированных сред для моделирования спекания порошков. Будут адаптированы коды SPH и молекулярно-динамический код с учетом теплопроводности с помощью блока Монте-Карло внутри молекулярно-динамической программы. Будет решена задача о потоке тепла от стационарного движущегося лазерного источника, и о потоке тепла и волн давления от импульсного источника. (В.В. Жаховский, Е.А. Перов, С.А. Дьячков, С.Ю. Григорьев, С.А. Мурзов)

#### **4.11. Ожидаемые в конце первого года конкретные научные результаты (форма изложения должна дать возможность провести экспертизу результатов и оценить степень выполнения заявленного в проекте плана работы)**

*на русском языке*

- 1) Будут получены диаграммы давления и плотности в тонких пленках и подложках, иллюстрирующие механизм образования отверстий при различных вложенных энергиях. Будет проведено сравнение расчетных размеров отверстий, полученных в результате гидродинамических и молекулярно-динамических расчетов с размерами отверстий, наблюдаемыми в натурном эксперименте.
- 2) Будут получены профили давления в мишенях, иллюстрирующие характер структуры поверхностного слоя мишеней из алюминия при варьировании энергии и длительности одиночных ультракоротких лазерных импульсов. Будут получены профили давления и плотности для выбранных потенциалов межатомного взаимодействия алюминия и профили давления и плотности алюминия, построенные на основе УРС в форме Ми-Грюнайзена при различных параметрах, а также профили давления и плотности решений тестовых задач. Будут построены двумерные и одномерные диаграммы давлений в алюминиевой мишени в течение всего времени прохождения ударной волны, полученные с помощью гидродинамических и молекулярно-динамических расчетов.
- 3) Будут получены модели теплопроводности гранулированных сред для моделирования спекания порошков. Будут получены интегральные средние коэффициенты теплопроводности для гранулированной среды. Будут адаптированы коды SPH и молекулярно-динамический код с учетом теплопроводности с помощью блока Монте-Карло внутри молекулярно-динамической программы. Будет решена задача о потоке тепла от стационарного движущегося лазерного источника, и о потоке тепла и волн давления от импульсного источника. Будут получены профили давления и температуры в объеме образца в зависимости от скорости сканирования луча и его мощности.

*на английском языке*

- 1) Pressure and density diagrams in thin films and substrates will be obtained, illustrating the mechanism of hole formation at various embedded energies. The calculated hole sizes obtained as a result of hydrodynamic and molecular dynamic calculations will be compared with the hole sizes observed in a full-scale experiment.
- 2) Pressure profiles in targets will be obtained, illustrating the nature of the structure of the surface layer of aluminum targets with varying energy and duration of single ultrashort laser pulses. Pressure and density profiles for the selected aluminum interatomic interaction potentials and aluminum pressure and density profiles based on URS in the form of Mi-Gruneisen at various parameters will be obtained, as well as pressure and density profiles of solutions to test problems. Two-dimensional and one-dimensional pressure diagrams will be constructed in an aluminum target during the entire time of the shock wave passage, obtained using hydrodynamic and molecular dynamic calculations.
- 3) Models of the thermal conductivity of granular media will be obtained to simulate the sintering of powders. Integral

average thermal conductivity coefficients for the granular medium will be obtained. The SPH codes and the molecular dynamic code will be adapted taking into account thermal conductivity using the Monte Carlo block inside the molecular dynamic program. The problem of heat flow from a stationary moving laser source and the flow of heat and pressure waves from a pulsed source will be solved. Pressure and temperature profiles in the sample volume will be obtained depending on the scanning speed of the beam and its power.

**4.12. Перечень планируемых к приобретению за счет гранта оборудования, материалов, информационных и других ресурсов для выполнения проекта (в том числе – описывается необходимость их использования для реализации проекта)**

Две современных высокопроизводительных рабочие станции.

**4.13. Файл с дополнительной информацией 1**

С графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. Один файл в формате pdf, до 3 Мб.

Текст в файлах с дополнительной информацией должен приводиться на русском языке. Перевод на английский язык требуется в том случае, если руководитель проекта оценивает данную информацию существенной для эксперта.

---

**4.14. Файл с дополнительной информацией 2 (на английском языке)**

С графиками, фотографиями, рисунками и иной информацией о содержании проекта. Один файл в формате pdf, до 3 Мб.

---

Подпись руководителя проекта \_\_\_\_\_ /В.В. Шепелев/

## Форма 5. Запрашиваемое финансирование на 2022 год

### 5.1. Планируемые расходы по проекту

№ п.п.	Направления расходования средств гранта	Сумма расходов (тыс.руб.)
	<b>ВСЕГО</b>	7000
	Вознаграждение членов научного коллектива (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии), без лиц категории «вспомогательный персонал»)	5700
	Вознаграждение лиц категории «вспомогательный персонал» (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии))	0
1	Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии))	5700
2	Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта (не более 15 процентов от суммы гранта)	0
3	Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (включая обучение работников, монтажные, пуско-наладочные и ремонтные***** работы) ***** Не связанные с осуществлением текущей деятельности организации.	200
4	Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования	0
5	Иные расходы для целей выполнения проекта	400
6	Накладные расходы организации (не более 10 процентов от суммы гранта)	700

### 5.2. Расшифровка планируемых расходов

№ п.п.	Направления расходования средств гранта, расшифровка
1	<p>Итого вознаграждение (с учетом страховых взносов и налогов (при наличии))</p> <p>(указывается сумма вознаграждения (включая руководителя, основных исполнителей и иных исполнителей, привлекаемых к выполнению работ по проекту), включая установленные законодательством Российской Федерации гарантии, отчисления по страховым взносам на обязательное пенсионное страхование, на обязательное медицинское страхование, на обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством, на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний)</p> <p>Шепелев В.В. 870 тыс.руб.  Жаховский В.В. 810 тыс. руб.  Ильницкий В.В. 810 тыс. руб.  Хохлов В.А. 810 тыс. руб.  Перов Е.А. 600 тыс. руб.  Дьячков С.А. 600 тыс. руб.  Григорьев С.Ю. 600 тыс. руб.  Мурзов С.А. 600 тыс. руб.</p>
2	<p>Оплата научно-исследовательских работ сторонних организаций, направленных на выполнение научного проекта</p> <p>(приводится перечень планируемых договоров (счетов) со сторонними организациями с указанием предмета и суммы каждого договора)</p>



0

3 Расходы на приобретение оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования

(представляется перечень планируемых к закупке оборудования и иного имущества, необходимых для проведения научного исследования (в соответствии с п. 4.12 формы 4))

200 тыс. руб. - Рабочая станция для проведения высокопроизводительных вычислений, 2 шт.

4 Расходы на приобретение материалов и комплектующих для проведения научного исследования

(представляется расшифровка запланированных материалов и комплектующих (в соответствии с п. 4.12 формы 4))

0

5 Иные расходы для целей выполнения проекта

(приводятся иные затраты на цели выполнения проекта, в том числе на командировки, оплату услуг связи, транспортных услуг, расходы не расшифровываются)

400 тыс. руб. - Оплата участия в конференциях по теме проекта

Подпись руководителя проекта \_\_\_\_\_ /В.В. Шепелев/

**Подпись руководителя организации** (уполномоченного представителя, действующего на основании доверенности или распорядительного документа), **печать** (при ее наличии) **организации.**

В случае подписания формы уполномоченным представителем организации (в т.ч. – руководителем филиала) к печатному экземпляру заявки прилагается копия распорядительного документа или доверенности, заверенная печатью организации.

\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/

М.П.