



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института теоретической
физики им. Л. Д. Ландау РАН
д.ф.-м.н., доцент

И. В. Колоколов

ВЫПИСКА

из протокола заседания Сектора плазмы и лазеров
Института теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН
5 декабря 2024 г.

(Заключение о диссертации В. А. Хохлова
«Двухтемпературная гидродинамика при воздействии
ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени
по месту ее выполнения»)

СЛУШАЛИ: Доклад В. А. Хохлова по диссертации «Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени», представленный на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 — «теоретическая физика (физико-математические науки)»

ПОСТАНОВИЛИ: Принять следующее заключение о диссертации В. А. Хохлова «Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени»:

В диссертационной работе В. А. Хохлова строится гидродинамика и исследуются течения в веществе в особом неравновесном двухтемпературном ($2T$) состоянии, когда температура электронной подсистемы заметно превышает фононную температуру атомной подсистемы. Несмотря на краткость существования таких состояний, их эволюция после воздействия ультракороткого лазерного импульса определяет всю последующую динамику и фазовые превращения вещества.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Все главы построены единым образом: сначала теоретическое рассмотрение участвующих процессов и построение физической модели, затем описание результатов расчетов по соответствующей численной схеме, их анализ и сопоставление с известными результатами экспериментов и молекулярно-динамического моделирования.

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована цель работы. Приводится обзор хорошо установленных физических фактов,

лежащих в основе $2T$ гидродинамики. В частности, то что благодаря большой разнице масс электронов и атомов характерные времена электрон–электронной и ион–ионной (фононной) релаксации в металлах τ_{ee} и τ_{ii} значительно меньше, чем характерное время электрон–ионной релаксации τ_{ei} . Это позволяет на промежуточных временах $\tau_{ee}, \tau_{ii} \ll t \ll \tau_{ei}$ считать что в веществе существует $2T$ состояние, в котором электронная (электронов проводимости) и ионная (фононная) подсистемы металла являются квазиравновесными и имеют установившиеся температуры T_e и T_i , но эти температуры могут не совпадать. Принципиальным отличием ультракоротких (пикосекундной и меньшей длительности) лазерных импульсов (УКЛИ), изучению процессов, происходящих при воздействии которых в конденсированном веществе мишеней, посвящена диссертация В.А. Хохлова. является то, что их длительности τ_L лежат в указанном диапазоне $\tau_{ee}, \tau_{ii} \ll \tau_L < \tau_{ei}$, и при их воздействии возникает $2T$ состояние, что существенно влияет на протекающие процессы.

В первой главе построена согласованная теоретическая модель и соответствующая система уравнений $2T$ гидродинамики ($2T$ ГД) для конденсированного вещества. Такая $2T$ гидродинамика необходима для моделирования воздействия коротких лазерных импульсов на металлы при не очень больших мощностях излучения. Надо отметить, что развитая $2T$ гидродинамика имеет принципиальные отличия от моделей $2T$ плазмы: существенны другие эффекты, возникают принципиально новые явления. Впервые $2T$ модель процессов электронно–ионного обмена и электронной теплопроводности в металлах была предложена С.И. Анисимовым и др. в 1974 г. В работе 2006 г. В.А. Хохловым с использованием этой модели была построена модель $2T$ гидродинамики, которая с необходимыми дополнениями используется в последующих главах.

В первой главе также проанализированы условия, при которых рассмотрение теплового баланса отдельно в электронной и ионной подсистемах является корректным. Рассмотрено использование уравнений состояния (УРС) для электронной и ионной подсистем в различных металлах, соответствующие коэффициенты теплопроводности и электрон–ионного теплообмена.

С использованием численного моделирования исследован нагрев объемной металлической мишени лазерным импульсом со стороны свободной поверхности и распространение тепла из скин–слоя вглубь мишени. Принципиально важным новым эффектом при этом является быстрое (сверхзвуковое) распространение тепла благодаря большой теплопроводности электронной подсистемы на $2T$ стадии $T_e \gg T_i$. Показано принципиальное отличие гомогенного плавления при постепенном подтягивании ионной температуры к ушедшей на большую глубину от поверх-

ности на $2T$ стадии большой электронной температуре от классического ($1T$) движения фронта плавления при гетерогенном плавлении, которое с неплохой точностью описывается в приближении задачи Стефана.

В результате быстрого почти изохорического нагрева при воздействии УКЛИ в приповерхностном прогретом слое возникает высокое давление. Его разгрузка приводит к растяжению. При достаточной поглощенной энергии растяжение может превысить прочность вещества.

Проанализировано, почему обычно используемые критерии разрыва оказываются неприменимыми на пикосекундных временах, и предложена форма критерия разрыва, дающего в гидродинамическом расчете полное соответствие основных характеристик процесса — порога отрыва, момента и глубины отрыва — молекулярно-динамическому моделированию и результатам экспериментов. Показано, что при превышении порога откола, разрыв (откольная абляция) происходит на глубине, соответствующей толщине слоя, прогретого на $2T$ стадии, с ростом поглощенной энергии толщина оторвавшейся пленки уменьшается, между ней и дном кратера возникает область, заполненная паро-жидкостной смесью. В результате возникает полупрозрачный купол, опирающийся на практически плоское основание, что соответствует схеме опытов Ньютона (с перевернутой линзой). При отражении от дна кратера и купола и интерференции зондирующего импульса возникают «кольца Ньютона». Это явление возникает исключительно в результате $2T$ -ГД при воздействии ультракоротких лазерных импульсов и отсутствует при воздействии более длинных импульсов.

Проведенное в работах В.А. Хохлова исследование позволило последовательно объяснить этот эффект.

Во второй главе рассмотрено воздействие УКЛИ рентгеновского (жесткого ультрафиолета) спектра на прозрачные диэлектрики. В отличие от рассмотренных в первой главе металлов, у диэлектриков в невозбужденном состоянии электроны проводимости отсутствуют, но, под воздействием рентгеновского излучения, могут возбуждаться. Для учета этого рассмотренная в первой главе $2T$ ГД дополнена учетом динамики плотности числа возбужденных электронов (степени ионизации) и зависимостью от этой плотности электронных свойств.

Проведенные расчеты показали, что в результате возникает откольная абляция, аналогичная рассмотренной в первой главе для металлов. Порог такой абляции получается значительно меньше, чем пороги абляции за счет других механизмов при воздействии более длинных импульсов. Это позволило впервые объяснить наблюдаемое в экспериментах резкое снижение порога абляции диэлектриков при воздействии УКЛИ рентгеновского (жесткого ультрафиолета) спектра по сравнению с

воздействием микросекундных и более длительных импульсов.

Третья глава посвящена рассмотрению прохождения тепловых и акустических возмущений и ударных волн (УВ) через мишень конечной толщины.

Принципиальным отличием твердого вещества от жидкости и газа является стремление к сохранению формы. При ее изменении, в том числе при одноосном сжатии, возникает сдвиговое напряжение.

Рассмотрено дополнение 2ТГД учетом действия упругих сдвиговых напряжений. Сравнение проведенных расчетов с экспериментальными результатами показывает, что общая картина движения в основном сохраняется. При правильном учете сдвиговых напряжений, время выхода на тыльную поверхность акустических возмущений и УВ соответствует экспериментам.

При действии УКЛИ из прогретой области вглубь мишени выходит волна сжатия, после опрокидывания становящаяся УВ, а выходящая в сторону свободной поверхности волна после отражения от нее становится волной разряжения, идущей сразу за УВ. В результате возникает короткая треугольная УВ. Сравнение расчетов с экспериментами показывает, что в такой УВ вещество остается упругим (скорость движения соответствует скорости звука при учете сдвиговой упругости) даже при значительном превышении напряжений в веществе классического предела упругости.

В четвертой главе исследовано воздействие УКЛИ на тонкие пленки на подложке и многослойные мишени.

Проанализированы особенности использования лагранжевого подхода при наличии слоев веществ с существенно разными свойствами: металлической пленки на диэлектрической подложке, ламината из тонких слоев различных металлов. Удобством лагранжевого подхода при моделировании таких систем является то, что лагранжевы координаты привязаны к веществу, и начальное распределение веществ по лагранжевым ячейкам затем сохраняется.

Рассмотрены колебания тонкой металлической пленки на диэлектрической подложке при поглощенной энергии лазерного импульса меньше порога отрыва пленки и показано что получаемые в расчетах временные зависимости точно соответствуют экспериментальным при правильном учете сдвигового напряжения.

Рассмотрен отрыв пленки от подложки при превышении порога отрыва и объяснено образование жидкого купола.

На примере наноламината из чередующихся слоев никеля и алюминия толщиной в десятки нанометров исследовано воздействие УКЛИ на ламинаты. Полученный в расчетах порог отрыва первого слоя никеля

соответствует экспериментам. Показано, что второй отрыв происходит в алюминии вблизи границы с первым слоем никеля, что указывает на то, что адгезия жидких никеля и алюминия не меньше прочности жидкого алюминия.

Пятая глава посвящена исследованию частного случая многослойной системы, имеющему большое практическое применение — лазерной абляции в жидкость (ЛАЖ) на примере абляции золота в воду. ЛАЖ является одним из основных методов получения наночастиц.

Как и в случае воздействия УКЛИ на сплошные мишени, рассмотренном в первой главе, в этом случае при превышении порога абляции от металлической мишени отрывается жидкий слой. Однако, в отличие от абляции в вакуум (в воздух), жидкость замедляет отлетающий слой. В системе отсчета, связанной с поверхностью раздела жидкости и металла, где тяжелая жидкость — расплавленное золото — лежит над легкой жидкостью — водой, возникает условие для развития неустойчивости Рэлея—Тейлора. В дальнейшем из образовавшихся в результате роста неустойчивости наночапель жидкого золота в воде образуются крупные наночастицы (эта стадия не описываемой используемой одномерной 2ТГД, но подтверждается при совместном моделировании с молекулярно-динамическим методом).

При большей длительности лазерного импульса отрыва пленки не происходит, но у поверхности контакта не только вода, но и золото нагреваются до состояния сверхкритического флюида. При этом поверхностное натяжение на этой границе пропадает, и возникают условия для свободной взаимной диффузии золота и воды. В последующем разлете и остывании диффундировавшие в воду атомы золота собираются в кластеры из которых вырастают мелкие наночастицы (хотя лагранжевая 2ТГД эти процессы не описывает, но при совместном моделировании с молекулярно-динамическим методом описанное явление кластеризации наблюдается на атомном масштабе).

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 работах, индексируемых Web of Science: Core Collection, и/или Scopus

1. С. И. Анисимов, В. В. Жаховский, Н. А. Иногамов, К. Нишихара, Ю. В. Петров, В. А. Хохлов / *Разлет вещества и образование кратера при абляции под действием ультракороткого лазерного импульса* // ЖЭТФ. — 2006. — Т. 130(2). — С. 212–227.
2. S. I. Anisimov, N. A. Inogamov, Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, V. V. Zhakhovskii, K. Nishihara, M. B. Agranat, S. I. Ashitkov, P. S. Komarov / *Interaction of short laser pulses with metals at moderate intensities* // Appl. Phys. A. — 2008. — V. 92(4). — P. 939–943.

3. N. A. Inogamov, S. I. Anisimov, Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovskii, K. Nishihara, M. B. Agranat, S. I. Ashitkov, P. S. Komarov / *Theoretical and experimental study of hydrodynamics of metal target irradiated by ultrashort laser pulse* // Proc. SPIE. — 2008. — V. **7005**. — P. 70052F.
4. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovskii, S. I. Ashitkov, V. A. Khokhlov, Yu. V. Petrov, P. S. Komarov, M. B. Agranat, S. I. Anisimov, K. Nishihara / *Two-temperature relaxation and melting after absorption of femtosecond laser pulse* // Appl. Surf. Sci. — 2009. — V. **255**(24). — P. 9712–9716.
5. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat, P. S. Komarov, V. A. Khokhlov, V. V. Shepelev / *Pump-probe method for measurement of thickness of molten layer produced by ultrashort laser pulse* // AIP Conf. Proc. — 2010. — V. **1278**. — P. 590–599.
6. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, Y.V. Petrov, V. A. Khokhlov, S. I. Ashitkov, K. V. Khishchenko, K. P. Migdal, D. K. Ilnitsky, Y. N. Emirov, P. S. Komarov, C. W. Miller, I. I. Oleynik, M. B. Agranat, A. V. Andriyash, S. I. Anisimov, V. E. Fortov / *Electron-Ion Relaxation, Phase Transitions, and Surface Nano-Structuring Produced by Ultrashort Laser Pulses in Metals* // Contrib. Plasma Phys. — 2013 — V. **53**(10). — P. 796–810.
7. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, V. A. Khokhlov, S. I. Ashitkov, Yu. N. Emirov, K. V. Khichshenko, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, M. Ishino, M. ando, N. Hasegawa, M. Nishikino, P. S. Komarov, B. J. Demaske, M. B. Agranat, S. I. Anisimov, T. Kawachi, I. I. Oleynik / *Ultrafast lasers and solids in highly excited states: results of hydrodynamics and molecular dynamics simulations* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014 . — V. **510**. — P. 012041.
8. S. I. Ashitkov, P. S. Komarov, V. A. Zhakhovsky, Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, A. A. Yurkevich, D. K. Ilnitsky, N. A. Inogamov, M. B. Agranat / *Ablation of gold irradiated by femtosecond laser pulse: Experiment and modeling* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. **774**. — P. 012097.
9. N. A. Inogamov, A. Ya. Faenov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovskii, Yu. V. Petrov, I. Yu. Skobelev, K. Nishihara, Y. Kato, M. Tanaka, T. A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S. V. Bulanov, T. Kawachi, S. I. Anisimov, V. E. Fortov / *Spallative Ablation of Metals*

and Dielectrics // Contrib. Plasma Phys. — 2009. — V. 49. — No. 7–8. — P. 455–466.

10. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, A.Y. Faenov, V. A. Khokhlov, V. V. Shepelev, I. Yu. Skobelev, Y. Kato, M. Tanaka, T. A. Pikuz, M. Kishimoto, M. Ishino, M. Nishikino, Y. Fukuda, S. V. Bulanov, T. Kawachi, Yu. V. Petrov, S. I. Anisimov, V. E. Fortov / *Spallative ablation of dielectrics by X-ray laser* // Appl. Phys. A — 2010 — V. 101(1). — P. 87–96.
11. N. A. Inogamov, S. I. Anisimov, V. A. Zhakhovsky, A. Ya. Faenov, Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, V. E. Fortov, M. B. Agranat, S. I. Ashitkov, P. S. Komarov, A. Ya. Faenov, I. Yu. Skobelev, Y. Kato, T. A. Pikuz, V. V. Shepelev / *Ablation by shoft optical and X-ray laser pulses* // Proc. SPIE. — 2010. — V. 7996. — P. 79960T.
12. N. A. Inogamov, A. Ya. Faenov, V. A. Zhakhovsky, T. A. Pikuz, I. Yu. Skobelev, Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, V. V. Shepelev, S. I. Anisimov, V. E. Fortov, Y. Fukuda, M. Kando, T. Kawachi, M. Nagasono, H. Ohashi, M. Yabashi, K. Tono, Y. Senda, T. Togashi, T. Ishikawa / *Two-Temperature Warm Dense Matter Produced by Ultrashort Extreme Vacuum Ultraviolet-Free Electron Laser (EUV-FEL) Pulse* // Contrib. Plasma Phys. — 2011. — V. 51(5). — P. 419–426.
13. Н. А. Иногамов, С. И. Анисимов, В. В. Жаховский, А. Ю. Фаенов, Ю. В. Петров, В. А. Хохлов, В. Е. Фортов, И. Ю. Скобелев, Ю. Като, Т. А. Пикуз, В. В. Шепелев, Ю. Фукуда, М. Танака, М. Кишимото, М. Ишино, М. Нишикино, М. Кандо, Т. Кавачи, М. Нагасоно, Н. Охашаи, М. Ябашаи, К. Тано, Ю. Сенда, Т. Тогашаи, Т. Ишикава / *Абляция диэлектриков под действием коротких импульсов рентгеновских плазменных лазеров и лазеров на свободных электронах* // Оптический журнал. — 2011 — Т. 78(8). — С. 5–15.
14. М. Б. Агранат, С. И. Анисимов, С. И. Ашитков, В. В. Жаховский, Н. А. Иногамов, П. С. Комаров, А.В. Овчинников, В. Е. Фортов, В. А. Хохлов, В. В. Шепелев / *Прочностные свойства расплава алюминия в условиях экстремально высоких темпов растяжения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов* // Письма в ЖЭТФ. — 2010. — Т. 91(9). — С. 517–523.
15. Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, В. А. Хохлов, В. В. Шепелев / *Сверхупругость и распространение ударных волн в кристаллах* // Письма в ЖЭТФ. — 2011. — Т. 93(4). — С. 245–251.

16. N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, Yu. V. Petrov, S. I. Anisimov, V. A. Zhakhovsky, B. J. Demaske, I. I. Oleynik, S. I. Ashitkov, K. V. Khishchenko, M. B. Agranat, V. E. Fortov, C. T. White / *Ultrashort elastic and plastic shock waves in aluminum* // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. **1426**. — P. 909–912.
17. V. A. Zhakhovsky, B. J. Demaske, N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, S. I. Ashitkov, M. B. Agranat, I. I. Oleynik / Super-elastic response of metals to laser-induced shock waves // AIP Conf. Proc. — 2012. — V. **1464**. — P. 102–112.
18. D. K. Ilnitsky, V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, Yu. V. Petrov, K. V. Khishchenko, K. P. Migdal, S. I. Anisimov / *Two-temperature hydrodynamics of laser-generated ultrashort shock waves in elasto-plastic solids* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. **500**. — P. 032021.
19. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, V. A. Khokhlov, B. J. Demaske, K. V. Khishchenko, I. I. Oleynik / *Two-temperature hydrodynamic expansion and coupling of strong elastic shock with supersonic melting front produced by ultrashort laser pulse* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2014. — V. **500**. — P. 192023.
20. V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, V. V. Shepelev, D. K. Il'nitsky / *Thin 10–100 nm film in contact with substrate: Dynamics after femtosecond laser irradiation* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2015. — V. **653**. — P. 012003.
21. V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovsky, K. V. Khishchenko, N. A. Inogamov, S. I. Anisimov / *Metal film on a substrate: Dynamics under the action of ultrashort laser pulse* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — V. **774**. — P. 012100.
22. V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, D. K. Ilnitsky, K. P. Migdal, V. V. Shepelev / *Film-substrate hydrodynamic interaction initiated by femtosecond laser irradiation* // AIP Conf. Proc. — 2017. — V. **1793**. — P. 100038.
23. N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovsky, Yu. V. Petrov / *Energy redistribution between layers in multi-layered target heated by X-ray pulse* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. **946**. — P. 012009.
24. V. A. Khokhlov, S. I. Ashitkov, N. A. Inogamov, P. S. Komarov, A.N. Parshikov, Yu. V. Petrov, S. A. Romashevskii, E.V. Struleva, P.A.

- Tsygankov, V. A. Zhakhovsky / *Laser ablation of a multilayer target with layers of nanometer thickness* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2021. — V. 1787. — P. 012022.
25. С. А. Ромашевский, В. А. Хохлов, С. И. Ашитков, В. В. Жаховский, Н. А. Иногамов, П. С. Комаров, А. Н. Паршиков, Ю. В. Петров, Е. В. Струлева, П. А. Цыганков / *Фемтосекундное лазерное воздействие на многослойную наноструктуру металл-металл* // Письма в ЖЭТФ. — 2021. — Т. 113 (5). — С. 311–319.
 26. N. Inogamov, V. Zhakhovsky, V. Khokhlov / *Laser ablation of metal into liquid: Near critical point phenomena and hydrodynamic instability* // AIP Conf. Proc. — 2018. — V. 1979. — P. 190001.
 27. Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, В. А. Хохлов / *Динамика абляции золота в воду* // ЖЭТФ. — 2018. — Т. 154(1). — С. 92–123.
 28. Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovsky, N. A. Inogamov / *Hydrodynamic phenomena induced by laser ablation of metal into liquid* // Appl. Surf. Sci. — 2019. — V. 492. — P. 285–297.
 29. I Yu. V. Petrov, N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, V. A. Khokhlov / *Condensation of laser-produced gold plasma during expansion and cooling in a water environment* // Contrib. Plasma Phys. — 2019. V 59(6). — P. e201800180.
 30. Yu. V. Petrov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovsky, N. A. Inogamov / *Laser ablation in liquid* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2020. — V. 1556. — P. 012002.
 31. V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky / *Laser ablation in liquid: Heating, diffusion, and condensation* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2020. — V. 1556. P. 012003.
 32. S. I. Anisimov, N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, Yu. V. Petrov, V. A. Zhakhovsky / *Physical processes in laser ablation into liquid and laser shock wave pinning* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2020. — V. 1556. — P. 012004.
 33. N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, Yu. V. Petrov, V. A. Zhakhovsky / *Hydrodynamic and molecular-dynamics modeling of laser ablation in liquid: from surface melting till bubble formation* // Opt. and Quant. Electron.. — 2020. — V. 52(2). — P. 63.

34. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, D. K. Ilitsky, V. A. Khokhlov / *Laser shock peening* // J. Phys.: Conf. Ser. — 2021. — V. 1787. — P. 012024.
35. Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, В. А. Хохлов / *Физические процессы при лазерной абляции в жидкость* // Письма в ЖЭТФ. — 2022. — Т. 115 (1). — С. 20–27.

и 7 статей в сборниках конференций:

1. Н. А. Иногамов, В. В. Жаховский, Ю. В. Петров, В. А. Хохлов, С. И. Ашитков, С. И. Анисимов, М. Б. Агранат, К. Нишихара / *Гидродинамика взаимодействия ультракороткого лазерного импульса с веществом: сравнение расчётов с экспериментом* // Физика экстремальных состояний вещества — 2008 / Ред. В. Е. Фортов и др. — Черноголовка, ИПХФ РАН — С. 172–175.
2. N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, S. I. Ashitkov, V. A. Khokhlov, B. J. Demaske, S. I. Anisimov, M. B. Agranat, V. E. Fortov, I. I. Oleynik / *Ablation and Spallation of Metals by Femtosecond Laser Pulse* // 19th European Conference on Fracture, European Structural Integrity Society (ESIS), August 2012, Kazan, Russia. — ISBN 978-5-905576-18-8. — 2012. P. 226_proceeding.
3. S. I. Anisimov, A. Yu. Faenov, N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, Yu. V. Petrov, I. Yu. Skobelev, V. A. Zhakhovsky / *Ablation of lithium fluoride dielectric crystal by the short pulses of x-ray plasma laser and extreme ultraviolet free electron laser* // Physics of Extreme States of Matter — 2011 / Ed. by V. E. Fortov et. al. — Chernogolovka. — 2011. — P. 38–41.
4. N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovsky / *Elastic-plastic phenomena and propagation of strong shock waves under the action of femtosecond laser pulses* // Physics of Extreme States of Matter — 2011 / Ed. by V. E. Fortov et. al. — Chernogolovka. — 2011. — P. 11–14.
5. V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, V. A. Zhakhovsky, S. I. Anisimov / *Elastic-plastic phenomena in shock waves caused by short laser pulses. Comparison of hydrodynamic and molecular dynamics simulations* // Physics of Extreme States of Matter — 2013 / Ed. by V. E. Fortov et. al. — Chernogolovka. — 2013. — P. 61–64.
6. V. A. Khokhlov, N. A. Inogamov, S. I. Anisimov, V. A. Zhakhovsky, V. V. Shepelev, S. I. Ashitkov, P. S. Komarov, M. B. Agranat, V. E. Fortov /

Investigation of two-temperature relaxation in thin foil on a glass substrate initiated by the action of ultrashort laser pulse // Physics of Extreme States of Matter — 2010. / Ed. by V. E. Fortov et. al. — Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russia. Chernogolovka. — 2010. P. 127–129.

7. N. A. Inogamov, V. A. Khokhlov, V. A. Zhakhovsky, Yu. V. Petrov, K. V. Khishchenko, S. I. Anisimov / *Femtosecond Laser Ablation of Thin Films on Substrate // Progress In Electromagnetics Research Symposium. — PIERS Proceedings, July 6–9, 2015, Prague. — 2015. P. 2422–2426.*

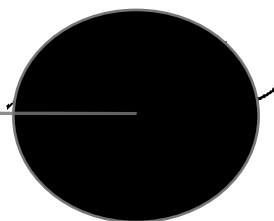
Большинство публикаций написано с соавторами по схеме: эксперимент, как правило проведенный сотрудниками ОИВТ РАН (С. И. Ашитков и др., А. Я. Фаенов и др.) — теоретический анализ на основе 2ТГД расчетов, при необходимости дополненных МД—моделированием, выполненным, как правило, В. В. Жаховским и др. В.А. Хохлов выполнил 2ТГД расчеты и принимал активное участие в обсуждении постановки задач и теоретическом анализе полученных результатов. Публикации, в которых основные обсуждаемые результаты относятся к эксперименту и/или МД—моделированию, а 2ТГД расчет играет только вспомогательную роль для запуска МД в список основных не включены.

Опубликованные по теме диссертации работы в достаточной мере отражают ее содержание. Объем и уровень проведенного исследования, а также новизна и актуальность полученных результатов, свидетельствуют о том, что диссертация Хохлова В.А. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико–математических наук.

На основании вышеизложенного Сектор плазмы и лазеров ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН рекомендует диссертацию Хохлова В.А. «Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени» к публичной защите по специальности 1.3.3 — «теоретическая физика (физико–математические науки)».

Зав. сектором плазмы и лазеров
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
д.ф.-м.н., член–корр. РАН

6 декабря 2024 г.



Н.А. Иногамов