

## ОТЗЫВ

официального оппонента **Тищенко Владимира Николаевича** на диссертационную работу **Галёва Романа Владимировича** «Исследование процессов поглощения и преобразования лазерного излучения в твердых и жидкокристаллических сплошных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкостей, газа и плазмы.

Диссертационная работа Галёва Романа Владимировича посвящена исследованию взаимодействия материалов с лазерным излучением: нагрев поверхности и микрочастиц; изменение параметров анизотропной среды и пучка при его прохождении, например, через тонкий слой жидкого кристалла. Параметры среды и пучка могут изменяться на масштабе взаимодействия, сравнимом с длиной волны излучения. Метод исследования – теория и численное моделирование на суперкомпьютерах, участие в экспериментах в рамках темы диссертации.

**Актуальность работы** продиктована практическими задачами улучшения качества лазерной обработки материалов и возможностями управления характеристиками электромагнитного излучения в оптоволокне посредством пропускания излучения через тонкий слой нематического жидкого кристалла (НЖК), который изменяет характеристики излучения в соответствии с распределением анизотропной оси.

**Целью работы** является повышение качества лазерной обработки материалов и управление параметрами электромагнитного излучения в оптоволокне с использованием НЖК.

Для достижения этой цели в диссертации решен **ряд задач**:

- Разработан комплекс программ, позволяющих проводить, с высоким пространственным разрешением, расчеты взаимодействия с твердыми и жидкими сплошными средами как путем прямого решения уравнений Максвелла, так и на основе методов геометрической оптики.
- Исследовано пространственное распределение поглощаемого излучения при лазерной обработке материалов, что позволило предложить ряд путей улучшения качества технологических процессов.
- Получены данные о преобразовании лазерного излучения в оптоволокне при взаимодействии с объёмом, заполненным жидкокристаллической средой, играющей роль элемента управления.
- Исследованы возможности генерации “закрученного света” (оптических вихрей, то есть пучков излучения с ненулевым орбитальным угловым моментом) с использованием нематических жидких кристаллов.
- Рассмотрено взаимное влияние анизотропной жидкокристаллической среды и узкого пучка лазерного излучения, исследованы возникающие при этом нелинейные эффекты, в частности явление гигантской оптической нелинейности.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

**Первая глава** содержит описание уравнений Максвелла для анизотропной пространственно неоднородной среды и численного метода FDTD (Finite Difference Time Domain) для их решения, постановки граничных и начальных условий,

особенностей численной генерации оптических пучков и неотражающих условий на границе расчетной области. Далее обосновывается использование вычислительных кластеров для параллельных вычислений и описывается реализация расчетного кода, позволяющего проводить параллельные расчеты. Уделено внимание верификации кода. Описан метод трассировки лучей, как альтернатива методу FDTD.

**Вторая глава** посвящена получению пространственных распределений источника тепла для частных, практически важных, случаев в задачах лазерной обработки материалов: лазерная резка, лазерное сверление, селективное лазерное спекание. При моделировании поглощения лазерного излучения в канале резки показано, что в случае круговой поляризации лазерного пучка, распределение источника тепла по поверхности реза несимметрично относительно вертикальной плоскости канала реза. Отмечено, что полученные численные данные послужили основанием для экспериментов, в которых был сделан вывод о существенном влиянии распределения поглощенной мощности излучения на качество поверхности и о том, что для получения меньшей шероховатости желательно прогревать излучением боковые стенки канала реза. При моделировании начального этапа лазерного сверления металла проведено сравнение результатов двух методов получения данных о поглощенной мощности — FDTD и метод трассировки лучей, и сделаны выводы о границах применимости методов. При моделировании взаимодействия излучения с веществом при селективном лазерном спекании получены данные об объемном распределении источника тепла в насыпном слое, и объяснено экспериментально наблюдаемое явление взрыва керамических частиц. Из-за сферической формы частицы излучение фокусируется, вследствие чего центр частицы прогревается лучше периферии; отсутствие такого явления в металлических частицах объясняется малой толщиной поглощающего скин-слоя, что не позволяет излучению достигнуть центра частицы и прогреть его.

**В третьей главе** описываются особенности и оптические свойства НЖК, а также классические пространственные распределения оптической оси с «особой точкой» — дисклинации. Приводятся данные моделирования прохождения лазерного излучения через область, заполненную НЖК с заданным распределением оптической оси. Делается вывод о предпочтительности использования, в качестве элемента управления оптоволоконной лазерной системой, полости с плоскопараллельными стенками. Также, в связи с изучением возможности генерации оптического вихря, исследуется фазовое распределение и момент импульса пучка электромагнитного излучения, пропущенного через слой НЖК. Дается оценочная формула для зависимости углового момента пучка от толщины слоя НЖК и предлагается объяснение немонотонного характера этой зависимости как результата анизотропных свойств среды, вследствие чего волны могут распространяться с двумя различными фазовыми скоростями. Рассмотрены распределения фазы в пучках с ненулевым орбитальным моментом, показана характерная зависимость фазового распределения от заданной дисклинации НЖК, выражающаяся в изменении количества поверхностей постоянной фазы в поперечном сечении пучка. Также показано отсутствие влияния слоя НЖК на угловой момент пучка в случае с начальным нулевым угловым моментом.

**Четвертая глава** посвящена исследованию взаимного воздействия электромагнитного поля и поля оси анизотропии НЖК. Исследуется динамика оси анизотропии нематической жидкости при прохождении через нее пучка

электромагнитного излучения, а также изменение пространственного распределения электромагнитного поля пучка, проходящего через слой НЖК, в котором ось анизотропии изменена электромагнитным полем пучка. С этой целью решается совместно уравнение ориентационной динамики НЖК, описывающее ось анизотропии, и уравнения Максвелла, описывающее электромагнитное поле. Находятся условия стохастического и стационарного режимов. Моделируются гигантская оптическая нелинейность и самофокусировка пучка — экспериментально наблюдаемые явления.

**Приложения** содержат решения сопутствующих аналитических задач и описания алгоритмов, на основе аналитических решений — построение электромагнитного поля «собственных мод оптоволокна» и «отражение и пропускание плоской волны стопкой пластин с параметрами холестерического жидкого кристалла» — созданных автором, использованных в диссертационной работе и имеющих самостоятельное значение.

**Научная новизна** представленных в диссертации результатов заключается в следующем:

- Метод прямого решения уравнений Максвелла впервые применен к задачам лазерной обработки материалов, в задаче о лазерной резке показана необходимость учета поляризации пучка и множественных отражений, в задаче о лазерном сверлении — учета интерференционных эффектов; в задаче о селективном лазерном спекании объяснены причины различного поведения керамических и металлических частиц.
- Определена предпочтительная, обеспечивающая меньшее рассеяние и позволяющая избежать фокусировки пучка, форма полости, заполненной нематическим ЖК, для использования в качестве элемента управления когерентным электромагнитным излучением в миниатюрной оптоволоконной системе.
- Предложен способ управления величиной углового момента генерируемого оптического вихря путем изменения толщины слоя и/или силы дисклинации нематического ЖК.
- Разработан расчетный код для совместного решения уравнений Максвелла и уравнений динамики ЖК-среды, показана возможность возникновения стохастических режимов при определенных поляризации и знаке диэлектрической анизотропии; воспроизведено в численном расчете явление самофокусировки лазерного пучка в нелинейной среде.

**Достоверность** полученных в диссертации Р. В. Галёва результатов, обосновывается использованием надежных численных алгоритмов, тщательной верификацией разработанных вычислительных программ, проведением тестовых расчетов и сравнением их результатов с аналитическими решениями ряда задач, сопоставлением многих численных результатов с экспериментальными данными.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в том, что в ней разработаны расчетные коды для моделирования взаимодействия лазерного излучения с веществом и решен ряд конкретных задач о взаимодействии лазерных пучков с твердыми и жидкокристаллическими сплошными средами. Выполнены расчеты распределения тепловых потоков в образцах, подвергающихся лазерной

обработке (резке, сверлению, спеканию). Результаты численного моделирования позволили сформулировать ряд практических рекомендаций по улучшению качества обработки материалов. Получены данные о рассеянии светового пучка и изменении его углового момента при прохождении через нематический ЖК, воспроизведено явление самофокусировки при взаимодействии пучка излучения с жидкокристаллической средой, в условиях, когда неприменимо приближение плоской волны. Данные о рассеянии излучения при взаимодействии с полостью, заполненной ЖК, позволили отказаться от применения полости цилиндрической формы в экспериментах по созданию миниатюрных оптоволоконных систем управления и рекомендовать использование для этих целей плоского слоя ЖК. Полученный результат о периодической зависимости углового момента пучка, прошедшего через слой нематического ЖК с дисклинацией, от толщины слоя и силы дисклинации, указывает на практический способ управления характеристиками оптического вихря.

**Апробация работы** представляется вполне достаточной, ее основные результаты опубликованы в научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе международных научных журналах, доложены на конференциях и семинарах. Общее число публикаций по теме диссертации – 14, в изданиях, рекомендованных ВАК – 7.

#### **Замечания:**

По непонятным причинам автор не включил в диссертацию экспериментальные результаты, полученные в совместных расчетно-экспериментальных работах с сотрудниками лаборатории лазерных технологий ИТПМ СО РАН и сотрудниками ИЛФ СО РАН, хотя они опубликованы в статьях, где он является соавтором. На мой взгляд результаты экспериментов могли бы существенно украсить работу и послужить дополнительным подтверждением сделанных в ней выводов.

В частности:

- Недостаточное внимание уделено сравнению результатов расчетов с экспериментальными данными при описании результатов численного моделирования процессов лазерной резки и сверления, хотя такое сравнение присутствует в опубликованной журнальной статье;
- Хотя в описании проведенных расчетов «закрутки» света при прохождении через слой нематического ЖК упоминается об экспериментах, проводимых в ИЛФ СО РАН, в диссертации сравнение экспериментальных и расчетных результатов по генерации оптических вихрей отсутствует.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и ее результатов.

Диссертационная работа написана хорошим языком, результаты достаточно подробно иллюстрируются и обсуждаются. Она представляет собой законченную научно-исследовательскую работу по актуальной тематике и содержит новые научные и практически значимые результаты, полученные в значительном объеме с использованием современных методов численного моделирования. Полученные в работе результаты соответствуют поставленным целям и задачам. Тема и содержание диссертации соответствует научной специальности 1.1.9 — механика

жидкости, газа и плазмы. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.

Считаю, что представленная диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Галёв Роман Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — механика жидкости, газа и плазмы.

Тищенко Владимир Николаевич, доктор физико-математических наук (01.04.21 - лазерная физика), главный научный сотрудник лаборатории энергетики мощных лазеров, Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН, <https://laser.nsc.ru>).

Адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б  
Тел. 8 (383) 333-29-67, E-mail: tvn25@ngs.ru

Дата 30.03.2023

И. Тищенко

Подпись главного научного сотрудника  
ИЛФ СО РАН, д.ф.-м.н. В.Н. Тищенко

лаборатории мощных лазеров

учёный секретарь ИЛФ СО РАН к.ф.-

В. Покасов

Я, Тищенко Владимир Николаевич, разрешаю  
использовать персональные данные в документы, с  
и их дальнейшую обработку.

председатель  
ионного совета,

Председателю  
диссертационного совета  
24.1.125.01 (Д 003035.02)  
академику В.М. Фомину

### ЛИЧНОЕ СОГЛАСИЕ ОППОНЕНТА

Я, Тищенко Владимир Николаевич, даю свое согласие выступить в качестве оппонента по диссертации *Галёва Романа Владимировича* на тему: Исследование процессов поглощения и преобразования лазерного излучения в твердых и жидкокристаллических сплошных средах на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

О себе сообщаю:

Ученая степень, отрасли науки	Д.ф.-м.н.
Научные специальности, по которым защищена диссертация	01.04.21- лазерная физика
Ученое звание	
Академическое звание	
Тел:	8-913-767-7262
E-mail:	tvn25@ngs.ru
Должность	Главный научный сотрудник
Подразделение организации	Лаборатория энергетики мощных лазеров
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук
Ведомственная принадлежность орг.	Министерство науки и высшего образования РФ
Адрес служебный: Почтовый индекс, город, улица, дом	630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б
Web-сайт организации.	<a href="https://laser.nsc.ru">https://laser.nsc.ru</a>
Телефон организации.	8 (383) 333-29-67
E-mail организации.	info@laser.nsc.ru

По теме рассматриваемой диссертации имею более 100 научных работы, в том числе в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 работ):

№	Авторы	Название статьи, журнал, год, том, №, страницы
1	V. N. Tishchenko,	Wave transport of momentum and angular momentum, created by a

	A. G. Berezuckiy, E. L. Boyarincev [et al.]	pulsed laser plasma in space. Numerical and laboratory modeling // AIP Conference Proceedings, Novosibirsk, 13–19 августа 2018 года. – Novosibirsk: American Institute of Physics Inc., 2018. – P. 030134. – DOI 10.1063/1.5065228.
2	А. Г. Березуцкий, В. Н. Тищенко, Ю. П. Захаров [и др.]	Генерация крутильных альфвеновских и медленных магнитозвуковых волн периодическими сгустками лазерной плазмы в замагниченном фоне // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – № 2. – С. 178-180.
3	В. Н. Тищенко, А. Г. Березуцкий, Л. Р. Дмитриева [и др.]	Преобразование лазерного излучения в низкочастотные МГД волны // Лазерные, плазменные исследования и технологии. Лаплаз-2022 : СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, ПОСВЯЩЕННОЙ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЛАУРЕАТА НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ БАСОВА НИКОЛАЯ ГЕННАДИЕВИЧА, Москва, 22–25 марта 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2022. – С. 34.
4	V. N. Tishchenko, A. G. Berezutsky, L. R. Dmitrieva [et al.]	Generation of Alfvén waves in magnetized plasma by laser plasma bunches at Mach numbers MUCH less than unity // Solar-Terrestrial Physics. – 2022. – Vol. 8. – No 2. – P. 91-97. – DOI 10.12737/stp-82202214.
5	A. G. Berezutsky, M. A. Efimov, Y. P. Zakharov [et al.]	Low-Frequency Whistlers Produced by Laser Plasma Clouds in a Magnetized Plasma // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2020. – Vol. 84. – No 7. – P. 803-806. – DOI 10.3103/S1062873820070060.
6	Vladimir Tishchenko, Artem Berezutsky, Eduard Boyarintsev, Yury Zakharov, Ilya Mirosnichenko, Vitaly Posukh, Arnold Ponomarenko, and Ildar Shaikhsislamov	Whistler waves generated by periodically repeating laser plasma bunches in magnetized plasma. Numerical simulation // AIP Conference Proceedings 2019, V. 2098, 020014, DOI: 10.1063/1.5098158
7	Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.	ГЕНЕРАЦИЯ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ И МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН ПЕРИОДИЧЕСКИМИ СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ФОНЕ // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 2. С. 178-180.
8	V N Tishchenko, A G Berezutsky, E L Boyarintsev, Yu P Zakharov, I B Mirosnichenko, V G Posukh1, A G Ponomarenko, A A Chibrarov and I F Shaikhsislamov	Low-frequency waves produced by a package of laser plasma clouds in a magnetized background // Journal of Physics: Conference Series, 2019, V. 1404, 012100, DOI: 10.1088/1742-6596/1404/1/012100
9	V.N. Tishchenko, A. G. Berezutsky, L. R. Dmitrieva, I. B. Mirosnichenko,	Influence of the expansion velocity of laser plasma bunches on the intensity of a plasma jet and quasistationary waves generated in a magnetic tube // AIP Conference Proceedings V. 2288, 2020, 030047, DOI: 10.1063/5.0028392

	and I. F. Shaikhislamov	
10	A G Berezutsky, V N Tishchenko, A A Chibrarov, I B Mirosnichenko, Yu P Zakharov and I F Shaikhislamov	Controlling the type and intensity of low-frequency waves generated by laser plasma clots in a force tube of magnetized plasma // Journal of Physics: Conference Series, 2021, V. 2067, 012019, DOI: 10.1088/1742-6596/2067/1/012019
11	Березуцкий А.Г., Ефимов М.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Пономаренко А.Г., Посух В.Г., Тищенко В.Н., Чибранов А.А., Шайхисламов И.Ф.	НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ВИСТЛЕРЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 7. С. 973-976.
12	Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Дмитриева Л.Р., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.	ГЕНЕРАЦИЯ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ЧИСЛАХ МАХА МНОГО МЕНЬШЕ ЕДИНИЦЫ // Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8. № 2. С. 101-107.

Не являюсь членом экспертного совета ВАК

Согласен на включение моих персональных данных в аттестационное дело соискателя и их дальнейшую обработку.

Главный научный сотрудник лаборатории энергетики мощных лазеров ИЛФ СО РАН,  
д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Тищенко

Подпись главного научного сотрудника \_\_\_\_\_ Тищенко  
д.ф.-м.н. В.Н. Тищенко заверяю \_\_\_\_\_ Тищенко  
учёный секретарь ИЛФ СО РАН к.ф.-м. \_\_\_\_\_ Тищенко

Дата 19.01.2023