



**МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
(МГУ)**

Ленинские горы, Москва,

ГСП-1, 119991

Телефон: 8-495-939-10-00

Факс: 8-495-939-01-26

07.04.2025 № 176-25/013-03

На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор ФГБОУ ВО «Московский
государственный университет имени
М.В. Ломоносова»

Федянин Андрей Анатольевич

« 07 »

04

2025

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Якупова Эдуарда Олеговича на тему
«Исследование механизмов формирования пространственно-временных
структур, возникающих на движущемся фронте реакции», выдвинутой на
соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности «1.3.3. – Теоретическая физика»

Общая характеристика работы

Представленная соискателем, Э.О. Якуповым, диссертационная работа
выполнена в Отделении теоретической физики федерального
государственного бюджетного учреждения науки «Физический институт им.
П. Н. Лебедева Российской академии наук». Поступивший на Механико-
математический факультет МГУ экземпляр рукописи содержит 112 страниц
машинописного текста, 40 рисунков и 3 таблицы. Список цитированной
автором литературы содержит 113 источников. Работа состоит из введения,
шести глав основного текста, заключения, четырёх приложений и списка

цитируемой литературы. Работа написана грамотным русским языком, по своему внешнему оформлению она отвечает требованиям ВАК.

Диссертация Якупова Эдуарда Олеговича посвящена решению актуальных задач в области нелинейной динамики, посвященной описанию автоволновых и диссипативных структур, возникающих на движущемся фронте реакции. Изучение явлений пространственно-временной самоорганизации часто представляет собой сложную научную проблему. Специфический вид самоорганизации, а именно, возникновение структур на движущемся фронте, может возникать, в том числе, в химических системах, в которых реакция происходит не однородно в пространстве, а в виде распространяющихся волн. Особый интерес представляют системы горения, так как они демонстрируют экспериментально наблюдаемые структуры, возникающие на фронте за счет диффузионно-тепловой неустойчивости, когда фронт пламени распространяется в предварительно смешанной газовой смеси.

Диссертационная работа Э.О. Якупова включает в себя оригинальные теоретические результаты, посвященные вопросам формирования и эволюции сложных пространственно-временных структур в распределенных динамических системах, с особым фокусом на процессы, происходящие на движущемся фронте химических реакций. В основе исследования лежит разработанный автором единый подход, учитывающий иерархическую природу механизмов пространственно-временной самоорганизации через построение блочных моделей. **Актуальность** данного исследования не представляет сомнения, поскольку оно может дать ключ не только к объяснению лежащих в основе механизмов, но и предложить пути для их регуляции.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые сформулирован единый подход к объяснению широкого класса сложных пространственно-временных структур, возникающих в распределённых динамических системах, основанный на учёте иерархической природы механизмов, ответственных за формирование таких структур. Этот

подход существенно расширяет возможности теоретического описания процессов структурообразования в химических и физических системах, а также могут быть использованы при разработке эффективных технологий сжигания топлива в энергетических установках, что определяет не только теоретическую, но и практическую значимость работы.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, новизна и практическая значимость. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводятся основные сведения о пространственно-временных структурах различной природы, в частности, на движущемся фронте реакции, приводится описание проведенных ранее экспериментов и наблюдений. Особое внимание уделяется нелинейным структурам в процессах горения. В главе также представлены базовые математические модели, которые использованы в качестве блоков в исследуемых феноменологических моделях.

Вторая глава посвящена исследованию систем, составленных из нескольких феноменологических блоков, достаточно простых и естественных с одной стороны и позволяющих качественно продемонстрировать поведение пространственно-временных структур с другой. Цель данной главы — продемонстрировать принципиальную возможность описания структур на фронте с использованием блочных моделей. Был рассмотрен простейший — двумерный — случай, когда плоская волна движется вдоль одной оси и описывается первой подсистемой, а структуры формируются внутри получившегося фронта, но распространяются вдоль другой оси и описываются второй подсистемой. В результате рассмотрения нескольких комбинаций известных базовых моделей продемонстрирована потенциальная возможность качественно объяснить возникновение сложных структур на движущемся фронте.

Третья глава посвящена исследованию спиральных и кольцевых автоволновых структур, возникающих на движущемся фронте реакции в трехмерной области. Численно исследована зависимость существования таких структур от скорости распространения и толщины фронта. Исследование проводилось на основе модели, в качестве блоков которой были выбраны модели Фишера-КПП и Фицхью-Нагумо.

В четвёртой главе продолжено исследование представленной выше модели для объяснения возникновения диссипативных структур на движущемся фронте в трехмерном пространстве. В частности, проведено исследование условия их формирования в зависимости от скорости и толщины фронта при разных значениях параметров, отвечающих за диффузионную (тьюринговскую) неустойчивость.

Пятая глава посвящена применению иерархического подхода для теоретического описания экспериментально наблюдаемых автоволновых спиральных структур, возникающих при горении богатого водород-воздушного пламени при высоком давлении. Была проведена систематическая редукция кинетического механизма горения водород-воздушного топлива, в результате которой выделен механизм, приводящий к образованию автоволновых структур на фронте горения. Продемонстрировано, что фронт горения распадается на два слоя – условно горячий и холодный, при этом показано, что автоволновые структуры, наблюдаемые в эксперименте, могут формироваться в холодном слое фронта. Полученная редуцированная модель продемонстрировала не только хорошее качественное, но и количественное согласие с экспериментом.

В шестой главе продемонстрировано, что при иных экспериментальных условиях, приводящих к изменению параметров модели, она способна объяснить возникновение на фронте горения не только волновых, но и ячейистых (тьюринговских) структур.

В заключении сформулированы основные научные результаты, полученные в диссертации.

Рассматриваемая диссертационная работа достаточно полно отражена в Автореферате. Полученные в ходе ее выполнения результаты в полной мере отображены в шести публикациях диссертанта в журналах из Белого списка, три из которых относятся к первому уровню, а также доложены на конференциях. Все основные выносимые на защиту положения и выводы представляются **достоверными**, что определяется использованием современных методов математического моделирования и численного анализа, а также их согласием с имеющимися экспериментальными данными.

В целом диссертация заслуживает высокой оценки. Однако она не свободна от недостатков, к числу которых относятся следующие:

1. Используемые в параграфах 2.1 и 2.3 феноменологические модели не учитывают конкретные химические процессы и реакции, что контрастирует с акцентом вводных глав на химическую природу изучаемых явлений.
2. Не все термины чётко определены. В частности, автор разделяет понятия «диссипативная структура» и «автоволновая структура», хотя последняя является частным случаем диссипативных структур в широком смысле. Это требует уточнения и более строгого терминологического подхода.
3. Вступлениям к главам не хватает более строгих и подробных формулировок решаемых в них задач, чтобы улучшить логическую связность и структуру изложения.
4. Хотя в главе 5 приведены ссылки на литературу и приложение со списком реакций, механизм, описывающий горение водорода, требует более подробного пояснения. Это важно для понимания обоснованности выбора модели и её применимости.
5. После процедуры редукции в главе 5 необходимо явно указать, какие подсистемы рассматриваются в рамках предложенного иерархического подхода. Это позволит лучше связать результаты главы с общей методологией работы.

6. Автором предполагается, что разработанный подход является общим, однако это требует дополнительного обоснования и подтверждения на примерах других систем.

Высказанные замечания не снижают ценности научной и практической значимости работы и общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Таким образом, по своей актуальности, новизне и научно-практической значимости представленная работа «Исследование механизмов формирования пространственно-временных структур, возникающих на движущемся фронте реакции» соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а её автор Якупов Эдуард Олегович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3. — «Теоретическая физика», направление «10. Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей неравновесных систем. Разработка теории хаоса и турбулентности».

Диссертация выполнена на достаточно высоком научном уровне, содержит важные новые результаты в области моделирования механизмов формирования пространственно-временных структур. Представленные в диссертационной работе результаты могут быть использованы в научных и образовательных учреждениях, таких как МГУ, Нижегородский государственный университет, Саратовский государственный Университет, МФТИ, Институт химической физики РАН, Институт прикладной физики РАН, ИВТАН, ИТПМ СО РАН, НИЦ «Курчатовский институт».

Отзыв на диссертационную работу обсужден и одобрен на заседании Кафедры газовой и волновой динамики Механико-математического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный

университет имени М. В. Ломоносова» (протокол № 1 от «31 » марта 2025 г.),
и направляется в диссертационный совет 24.1.262.04 при Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки «Физический институт им.
П.Н. Лебедева Российской академии наук» по адресу: 119991, г. Москва,
Ленинский проспект, д. 53.

Отзыв составил:

Зам. зав. кафедрой газовой и

волновой динамики, д.ф.-м.н., профессор

Смирнов Николай Николаевич

Декан механико-математического ф-та
член-корреспондент РАН, профессор

Шафаревич Андрей Игоревич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Адрес ведущей организации: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1

Телефон: (495) 939-27-29, e-mail: info@rector.msu.ru

Официальный сайт: www.msu.ru

Список работ ведущей организации:

1. Smirnov, N. N., et al. "Control of detonation in hydrogen-air mixtures." *International Journal of Hydrogen Energy* 49 (2024): 1315-1324
2. Smirnov, N. N., et al. "Safety of using hydrogen: Suppression of detonation in hydrogen-air mixtures." *Acta Astronautica* 224 (2024): 69-81.
3. Smirnov, N. N., et al. "Modelling cellular structure of detonation waves in hydrogen-air mixtures." *International Journal of Hydrogen Energy* 49 (2024): 495-509.
4. Zvyagin, A. V., A. S. Udalov, and A. A. Shamina. "Numerical modeling of heat conduction in bodies with cracks." *Acta Astronautica* 214 (2024): 196-201.
5. Stamov, Lyuben Ivanovich, et al. "Modeling of Processes in the Combustion Chamber of a Hybrid Solid-Fuel Engine." *Moscow University Mechanics Bulletin* 79.3 (2024): 97-101.
6. Nikitin, Valeriy, et al. "Mathematical modeling of the hydrodynamic instability and chemical inhibition of detonation waves in a syngas–air mixture." *Mathematics* 11.24 (2023): 4879.
7. Nikitin, V. F., et al. "Evolution of the cellular structure of detonation waves under the condition of non-uniform initiation." *Acta Astronautica* 213 (2023): 156-167.
8. Smirnov, Nickolay, Valeriy Nikitin, Elena Mikhilchenko, and Lyuben Stamov. "Modeling a combustion chamber of a pulse detonation engine." *Fire* 6, no. 9 (2023): 335.
9. Smirnov, N. N., et al. "The usage of adaptive mesh refinement in simulation of high-velocity collision between impactor and thin-walled containment." *Acta Astronautica* 194 (2022): 401-410.
10. Shamina, A. A., et al. "Computational modeling of cracks different forms in three-dimensional space." *Acta Astronautica* 186 (2021): 289-302.
11. Smirnov, N. N. Different scenarios of shock wave focusing inside a wedge-shaped cavity in hydrogen-air mixtures / N. N. Smirnov, V. F. Nikitin, L. I. Stamov // *Aerospace Science and Technology*. – 2022. – Vol. 121. – P. 107382.
12. Срыв развитой детонации водородно-воздушной смеси малой добавкой углеводородного ингибитора / Н. Н. Смирнов, В. Ф. Никитин, Е. В. Михальченко, Л. И. Стамов // *Физика горения и взрыва*. – 2022. – Т. 58, № 5. – С. 64-71.
13. Крыжановский Б.В., Смирнов Н.Н., Никитин В.Ф., Карандашев Я.М., Мальсагов М.Ю., Михальченко Е.В. Использование нейронных сетей для моделирования задач горения // *Успехи кибернетики*. 2021. Т. 2, № 4. С. 15-29
14. Smirnov, Nickolay N., et al. "Macro kinetics for combustion in non-uniform dispersed fuel-air mixtures." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2304. No. 1. AIP Publishing, 2020.