

СИБИРСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
Основан в 2006 году

2022. Том 17, № 2

СОДЕРЖАНИЕ

Теоретическая и математическая физика

- Король А. О., Нефедев К. В., Капитан В. Ю.* Нейросетевой метод расчета точки Кюри двумерной модели Изинга 5

Физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы

- Сандалов Е. С., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И., Аржанников А. В., Логачев П. В., Бак П. А., Живанков К. И., Никифоров Д. А., Петренко А. В., Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Протас Р. В.* Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцовом ЛСЭ 16

Физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов

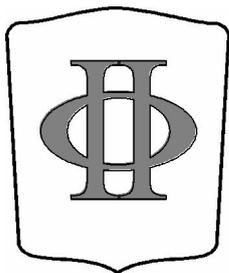
- Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Кочарин В. Л., Ермолаев Ю. Г.* Экспериментальное исследование влияния пары слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 30
- Лысенко В. И., Смородский Б. В., Косинов А. Д.* Влияние вдува газа с большой удельной теплоемкостью на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к контролируемым возмущениям 41
- Рубцов И. А.* Двухстадийная модель конденсации углерода при детонации конденсированных взрывчатых веществ 48

Физика химическая, биологическая, медицинская

- Осипова К. Н., Шмаков А. Г.* Структура пламени смесей аммиак/водород/кислород/аргон при повышенных давлениях 56

Учебно-методическое обеспечение преподавания физики

- Багаев С. Н., Бетеров И. И., Гончаров А. Н., Чепуров С. В., Тайченачев А. В.* Кафедра квантовой электроники 70
- Цыбуля С. В.* Кафедра физических методов исследования твёрдого тела физического факультета НГУ 75
- Пальчиков Е. И., Котельникова М. С.* Кафедра физики сплошных сред 81
- Пальчиков Е. И., Селезнёв В. А., Алексеев Е. Г.* Лекционные демонстрации по физике Новосибирского государственного университета 93
- Информация для авторов 105



Сибирский физический журнал

Журнал адресован профессорско-преподавательскому составу университетов, научным работникам, аспирантам и студентам, которые интересуются новейшими результатами фундаментальных и прикладных исследований по различным направлениям физики и физико-технической информатики.

Редакция принимает к опубликованию обзоры и оригинальные научные статьи по тем направлениям физики, которые, главным образом, представлены на кафедрах физического факультета НГУ. Принимаются также к рассмотрению статьи по другим направлениям, если в ходе рецензирования подтверждается их высокий научный статус.

Мы приглашаем научные коллективы и отдельных авторов направлять к нам для опубликования материалы по следующим основным разделам:

- квантовая оптика, квантовая электроника;
- радиофизика и электроника;
- теоретическая и математическая физика;
- физика жидкости, нейтральных и ионизованных газов;
- физика высоких энергий, ускорителей и высокотемпературной плазмы;
- физика твердого тела, полупроводников, наноструктур;
- физика химическая, биологическая и медицинская;
- информатика, информационно-коммуникационные технологии;
- учебно-методическое обеспечение преподавания физики.

Периодичность выхода издания – 4 раза в год. Журнал включен в перечень ВАК выпускаемых в Российской Федерации научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

SIBERIAN JOURNAL OF PHYSICS

Scientific Journal
Since 2006
In Russian

2022. Volume 17, № 2

CONTENS

Theoretical and Mathematical Physics

- Korol A. O., Nevedev K. V., Kapitan V. Yu.* Neural Network Method for Calculation of the Curie Point of the Two-Dimensional Ising Model 5

High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma

- Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Arzhannikov A. V., Logachev P. V., Bak P. A., Zhivankov K. I., Nikiforov D. A., Petrenko A. V., Ginzburg N. S., Peskov N. Yu., Protas R. V.* Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL 16

Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases

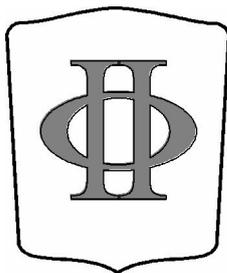
- Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Kocharin V. L., Yermolaev Y. G.* Experimental Study of Effect of a Pair of Weak Shock Waves on Laminar-Turbulent Transition in the Boundary Layer of Flat Plate at Mach Number 2 30
- Lysenko V. I., Smorodsky B. V., Kosinov A. D.* Effect of Injection of Gas with High Specific Heat Capacity on Supersonic Boundary-Layer Stability to Controlled Disturbances 41
- Rubtsov I. A.* Two-stage Carbon Condensation Model during Detonation of High Explosives 48

Chemical, Biological and Medical Physics

- Osipova K. N., Shmakov A. G.* Flame Structure of Ammonia/Hydrogen/Oxygen/Argon Mixtures at High Pressure 56

Educational and Methodological Provision of Teaching of Physics

- Bagayev S. N., Beterov I. I., Goncharov A. N., Chepurov S. V., Taichenachev A. V.* Chair of Quantum Electronics of Faculty of Physics NSU 70
- Tsybulya S. V.* Section of Physical Methods of Solid State Research of the Department of Physics of Novosibirsk State University 75
- Palchikov E. I., Kotelnikova M. S.* Chair of Continuous Media Physics 81
- Palchikov E. I., Seleznev V. A., Alekseev E. G.* Lecture Demonstrations of Experiments in Physics at the Novosibirsk State University 93
- Instructions for Contributors 105



Siberian Journal of Physics

The magazine is addressed to the faculty of universities, science officers, post-graduate students and students who are interested in the newest results fundamental and applied researches in various directions of physics and physico-technical computer science.

Edition accepts to publication reviews and original scientific articles in those directions of physics which, mainly, are presented on faculties of physical faculty of NSU. Are accepted also to viewing article in other directions if during reviewing their high title proves to be true.

We invite scientific personnel and separate authors to guide to us for publication materials on following basic sections:

- Quantum Optics, Quantum Electronics;
- Radiophysics and Electronics;
- The theoretical and Mathematical Physics;
- Physics of a Fluid, Neutral and Ionized Gases;
- High-Energy and Accelerator Physics, Physics of High-Temperature Plasma;
- Solid-state and semiconductor physics, physics of nanostructures;
- Chemical, Biological and Medical Physics;
- Computer Science, Information-Communication Technologies;
- Educational and Methodical Provision of Teaching of Physics

Periodicity of an exit of the edition – 4 times a year. The magazine is included in list Higher Attestation Committee of scientific and technical editions in Russian Federation in which the publication of the basic results of dissertations on competition of a scientific degree of the doctor and candidate of sciences is recommended.

Editor in Chief Andrej V. Arzhannikov
Executive Secretary Sofiya A. Arzhannikova

Editorial Board of the Journal

S. V. Alekseenko, A. V. Arzhannikov, A. L. Aseev, S. N. Bagaev, A. E. Bondar
S. A. Dzyuba, S. I. Eidelman, V. S. Fadin, V. M. Fomin, A. A. Ivanov, B. A. Knyazev, V. V. Kozlov, E. V. Kozyrev
A. V. Latyshev, I. B. Logashenko, V. P. Maltsev, A. G. Pogosov, A. L. Reznik, A. V. Shalagin
V. I. Telnov, S. V. Tsibulya

The series is published quarterly in Russian since 2006
by Novosibirsk State University Press

The address for correspondence
Physics Department, Novosibirsk State University
Pirogov Street 2, Novosibirsk, 630090, Russia
Tel. +7 (383) 363 44 25

E-mail address: physics@vestnik.nsu.ru
On-line version: <http://www.phys.nsu.ru/vestnik/>

Научная статья
УДК 004.032.26, 536.911
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-5-15

Нейросетевой метод расчета точки Кюри двумерной модели Изинга

Алена Олеговна Король¹,
Константин Валентинович Нефедев²,
Виталий Юрьевич Капитан³

¹⁻³Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Россия

¹korol.ao@dvfu.ru

²nefedev.kv@dvfu.ru

³kapitan.vyu@dvfu.ru

Аннотация

В работе рассматривается метод определения критической точки фазового перехода II рода модели Изинга на квадратной решётке с применением свёрточной нейронной сети. Данные для обучения и анализа получены с помощью Монте-Карло моделирования (алгоритм Метрополиса). Нейронная сеть обучалась на данных, соответствующих низкотемпературной фазе – ферромагнитной и высокотемпературной – парамагнитной, соответственно. После обучения нейронная сеть анализировала входные данные из всего температурного диапазона: от 0,1 до 5,0 (в безразмерных величинах J) и определяла точку Кюри T_c .

Ключевые слова

модель Изинга, точка Кюри, метод Монте-Карло, свёрточная нейронная сеть

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-2559.2022.1.2.

Для цитирования

Король А. О., Нефедев К. В., Капитан В. Ю. Нейросетевой метод расчета точки Кюри двумерной модели Изинга // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 5–15. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-5-15

Neural Network Method for Calculation of the Curie Point of the Two-Dimensional Ising Model

Alena O. Korol¹,
Konstantin V. Nevedev²,
Vitalii Yu. Kapitan³

¹Far Eastern Federal University,
Vladivostok, Russia

¹korol.ao@dvfu.ru

²nefedev.kv@dvfu.ru

³kapitan.vyu@dvfu.ru

Abstract

The authors describe a method for determining the critical point of a second order phase transitions using a convolutional neural network based on the Ising model on a square lattice. Data for training and analysis were obtained using Monte Carlo simulations. The neural network was trained on the data corresponding to the low-temperature phase, that is a ferromagnetic one and high-temperature phase, that is a paramagnetic one, respectively. After training, the neural network analyzed input data from the entire temperature range: from 0.1 to 5.0 (in dimensionless units J) and determined the Curie point T_c .

© Король А. О., Нефедев К. В., Капитан В. Ю., 2022

Keywords

Ising model, Curie point, Monte Carlo method, Convolutional neural network

Funding

This work was supported by a grant from the President of the Russian Federation for State Support of Leading Scientific Schools of the Russian Federation No. NSh-2559.2022.1.2.

For citation

Korol A. O., Nefedev K. V., Kapitan V. Yu. Neural network method for calculation of the Curie point of the two-dimensional Ising model. *Siberian Journal of Physics*. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 5–15. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-5-15

Введение

В основополагающих научных работах [1; 2], а также в современных трудах [3–5], большое внимание уделяется решеточным структурам. Например, конденсированные среды – твердые растворы с магнитными свойствами, могут быть рассмотрены как решетки из атомных или ионных магнитных моментов, каждый из которых локализован в своем конкретном месте [1; 6]. Взаимодействия между спинами в узлах решетки могут приводить к коллективному поведению и макроскопическим эффектам, например, таким широко известным как ферромагнетизм или антиферромагнетизм. Причиной спонтанного намагничивания или антиферромагнитного упорядочения является обменное взаимодействие, теория которого была представлена Гейзенбергом и Дираком в конце 1920 г. Исследование влияния пространственного упорядочения наночастиц, их геометрии, формы и законов взаимодействия между ними на термодинамические свойства и магнитные состояния имеют как фундаментальный, так и практический интерес. Как следствие этого, необходимо исследовать подходы и возможные способы управления вероятностью реализации определенных магнитных состояний ансамблей наночастиц [7–9].

Моделирование Монте-Карло или многократное имитационное моделирование вероятностей представляет собой класс вычислительных методов, с помощью которых можно оценить возможные результаты неопределенного события с помощью инструментов случайной выборки [10]. Применение суперкомпьютеров позволяет использовать новые классы алгоритмов и оперировать большими и сверхбольшими объемами данных при проведении численных экспериментов. Численные методы и компьютерное моделирование с использованием суперкомпьютеров имеют первостепенную важность в статистической и математической физике, нанопизике, статистической термодинамике, поскольку суперкомпьютеры существенно ускоряют решение задач и/или позволяют решать задачи, которые невозможно решить аналитическими методами.

Благодаря развитию суперкомпьютерных вычислительных систем [11], алгоритмы продолжают активно развиваться и совершенствоваться [12; 13]. При этом для физики конденсированного состояния характерна постоянно возрастающая сложность анализа исследуемых конфигураций в зависимости от числа частиц и уже предложены методы машинного обучения, позволяющие классифицировать и анализировать сложные наборы данных [14], но в настоящий момент ученые только начинают раскрывать весь потенциал внедрения методов машинного обучения в свои исследования [15].

1. Описание модели и методов

В данном исследовании рассматривается метод определения температуры Кюри двумерной модели Изинга с применением свёрточной нейронной сети. Для этого был использован алгоритм Метрополиса для генерации входных данных нейронной сети, после чего было проведено сравнение с результатами МК-моделирования, точным решением Онзагера и выходными данными после обучения нейронной сети. Все величины в работе приведены в безразмерных единицах J .

1.1. Модель Изинга

Ферромагнитное упорядочение возникает, когда набор атомных спинов выстраивается таким образом, где все связанные с ним магнитные моменты коллинеарны в одном направлении, что дает чистый магнитный момент макроскопического размера. Простейшее теоретическое описание ферромагнетизма задается моделью Изинга – одной из математических моделей статистической физики, применяемой для исследования фазовых переходов и критических точек. Данная модель имеет точное решение, полученное Онзагером: $\frac{T_c}{J} = \frac{2}{\ln(1+\sqrt{2})} = 2.269$ [16], с которым в настоящей работе сравнивались данные, получаемые другими методами.

В работе использовался гамильтониан для квадратной решетки спинов Изинга с четырьмя ближайшими соседями и периодическими граничными условиями. Математическая модель представляет собой совокупность дискретных переменных (значения магнитных моментов атомных спинов), которые могут принимать одно из двух значений: $S_i = \pm 1$, соответствующих одному из двух состояний. Система спинов Изинга имеет размер $N = L \times L$ и гамильтониан задается следующим выражением:

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j \quad (1)$$

где $J = 1$ – константа ферромагнитного взаимодействия [16].

1.2. Алгоритм Метрополиса

Алгоритм Метрополиса представляет собой Монте-Карло метод с цепью Маркова для получения последовательности случайных выборок из распределения вероятностей, для которых затруднена прямая выборка. Конфигурация системы с определенной вероятностью меняется на каждой итерации выборки за счет изменения ориентации случайно выбранного спина; алгоритм был детально рассмотрен ранее [17]. Несмотря на то, что алгоритм Метрополиса является часто применяемым инструментом при исследовании классических систем, вблизи критических точек эффективность резко снижается и возникает так называемое «критическое замедление», и движение системы в фазовом пространстве становится очень медленным. Соответственно для разрешения этой проблемы используются другие методы Монте-Карло, но в пользу большей точности, мы жертвуем скоростью вычислений и размерами исследуемых систем [12; 17]. Одной из перспективных альтернатив рассматривается применение нейронных сетей.

1.3. Нейросетевые алгоритмы глубокого обучения

Применение нейронных сетей в компьютерном моделировании приобретает все большую популярность в силу своей точности, производительности и наличия множества программных библиотек [14].

Нейронные сети для глубокого обучения представляют собой взвешенный направленный граф, узлы которого (нейроны) расположены слой за слоем. Каждый нейрон предыдущего слоя связан с нейронами последующего. Эти связи между ними имеют определенные веса, которые являются основной частью нейронных сетей: от весов связей зависит предсказание нейронной сети. Каждый нейрон имеет активационную функцию, которая отвечает за вес связи на его выходе. Таким образом, каждый слой архитектуры анализирует значения нейронов входного слоя, а активационные функции преобразуют значения весов между нейронами.

Веса нейронной сети изначально инициализируются случайным образом, а затем обновляются каждую эпоху обучения так, чтобы повысить общую точность сети. Для вычисления ошибки обучения – в каждую эпоху метки обучающих данных сравниваются с фактическими данными с помощью функции потерь, и затем вес обновляется соответствующим образом.

То, как обновить вес, регулирует оптимизатор, т. е. алгоритм, используемый для изменения параметров сети, таких как вес и скорость обучения, с целью минимизации значения функции потерь. Для оценки производительности модели используют метрики, представляющие собой функции, которые аналогичны функциям потерь, за исключением того, что результаты оценки метрики не используются при обучении модели.

В машинном обучении задача классификации относится к классу методов обучения с учителем. Такой метод предполагает, что для каждого из множества входных векторов существует целевой вектор, который представляет из себя желаемый выход. Размер выборки для обучения сети должен быть достаточно большим для формирования корректного отображения. Чтобы сеть корректно и быстро обучилась, необходимо правильно подобрать размер пакета данных для обучения. Размер пакета выбирают максимально возможным в зависимости от вычислительной мощности GPU. В свою очередь, количество эпох обучения зависит от размера обучающей выборки.

Обучение с учителем методом обратного распространения ошибки проходит в несколько этапов, которые повторяются на протяжении заданного количества эпох:

- 1) расчет выхода сети для каждого экземпляра входных данных;
- 2) сравнение полученного результата с соответствующим значением целевого вектора;
- 3) расчет ошибки с помощью функции потерь;
- 4) обратное распространение ошибки на вход;
- 5) корректировка параметров сети в соответствии с выбранным алгоритмом оптимизации (при условии ошибочного ответа).

Критерием останова обучения является заданный уровень ошибки на обучающей выборке [18].

1.3.1. Структура свёрточной нейронной сети

В данной работе была реализована архитектура свёрточной нейронной сети (convolutional neural network – CNN) [19; 20] с помощью программной библиотеки *TensorFlow* [21]. CNN – это класс глубоких нейронных сетей, наиболее часто применяемых для анализа и классификации визуальных образов. Созданная в ходе данного исследования свёрточная нейронная сеть состоит из нескольких слоев (см. рис. 1).

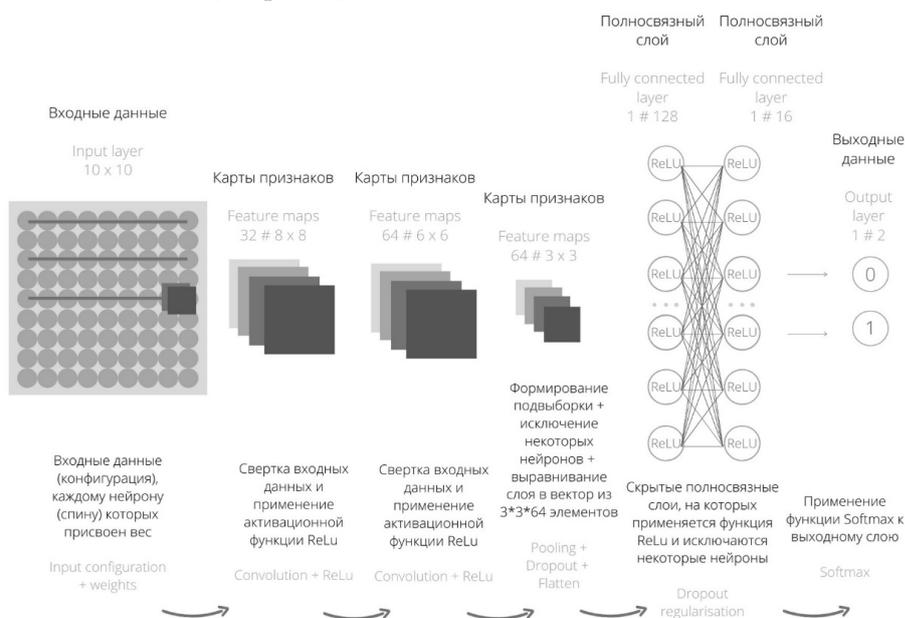


Рис. 1. Структура свёрточной нейронной сети

Входной слой содержит исходные значения спинов конфигурации модели Изинга. Над входным слоем производится операция свертки с использованием фильтра 3×3 , а именно – выделение признаков и формирование карты признаков (feature map) (см. рис. 2).

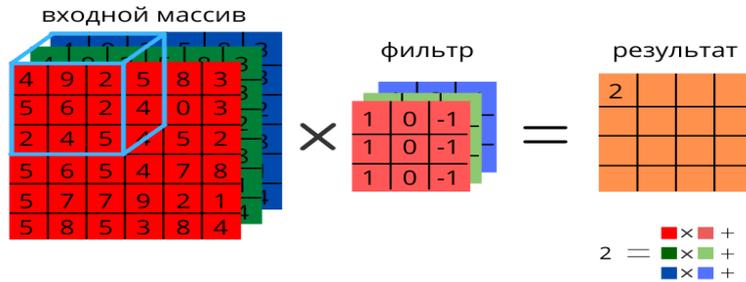


Рис. 2. Свёртка с фильтром 3×3

Для выделения признаков в каком-либо слое используют фильтры или так называемые «ядра». При движении фильтра по матрице происходит умножение каждого элемента фильтра на значение нейрона, далее значения суммируются и записываются в карту признаков. Если некоторая искомая характеристика присутствует в матрице, операция свёртки на выходе будет выдавать число с относительно большим значением. Если же характеристика отсутствует, выходное число будет маленьким:

$$x_j^l = f(\sum_i x_i^{l-1} * k_j^l + b_j^l), \tag{2}$$

где x_j^l – карта признаков j (выходной сигнал на уровне l), $f()$ – функция активации, применяемая поэлементно, b_j^l – пороговое значение (сдвиг) для карты признаков j , k_j^l – ядро свёртки с номером j , x_i^{l-1} – карты признаков предыдущего уровня, $*$ – операция свёртки.

Для того, чтобы обучение весов было эффективным, после операции свёртки следует ввести некоторое смещение (bias) и нелинейность (функцию активации), в качестве функции активации была использована *ReLU* (Rectified Linear Unit – усеченное линейное преобразование), эта кусочно-линейная функция, задается следующим образом:

$$f(x) = \max(0, x). \tag{3}$$

Данное преобразование заменяет все отрицательные значения нейронов в карте объекта на ноль и, таким образом, решает проблему аннулирования, а также приводит к гораздо более разреженному виду функции активации на его выходе. Разреженность в первую очередь обеспечивает нечувствительность к небольшим изменениям на входе, таким как шум [22].

Слой подвыборки (pooling layer) отвечает за уменьшение пространственного размера карт признаков. Несмотря на то, что он уменьшает размерность каждой карты, он сохраняет наиболее важную информацию (в разработанной сети $pool_{size} = 2$). Существуют различные стратегии подвыборки: максимальная, средняя и вероятностная. Подвыборка помогает сети быть инвариантной к небольшим трансформациям и искажениям данных входного слоя. Это также уменьшает количество параметров и вычислений в сети, а также минимизирует вероятность переобучения:

$$x^l = f(a^l \text{subsample}(x^{l-1}) + b^l),$$

где x^l – выход уровня l , $f()$ – функция активации, применяемая поэлементно, a^l , b^l – коэффициенты, *subsample* – операция выборки локальных максимальных значений (при условии, что выбрана стратегия максимальной подвыборки), т. е. максимальных значений в каждом окне *max-pooling*.

При тестировании нейронной сети нейроны уже не выбрасываются, но выход каждого нейрона умножается на величину $(1 - p)$.

После нескольких свёрточных слоев и блока подвыборки, трехмерное представление входных данных разворачивается в вектор – так называемый полносвязный слой (fully connected layer), который далее будет передан в многослойный перцептрон – обычную полносвязную нейронную сеть. Полносвязные слои используются для классификации. Все слои, идущие до полносвязных, используются для выделения различных признаков, которые подаются на вход классификатору:

$$x_j^k = f \left(\sum_{i=1}^m w_{ij} x_i^{k-1} \right), \quad (5)$$

где x_j^k – выходной сигнал для нейрона j на слое k , x_i^{k-1} – входной сигнал, w_{ij} – весовой коэффициент, $f()$ – функция активации.

Выходной слой отвечает за формирование вероятностей принадлежности входного образа тому или иному классу и определяется значениями нейронов выходных вероятностей нейронной сети. Сумма выходных вероятностей полносвязного слоя составляет 1, что обеспечивается путем использования *Softmax* в качестве функции активации. Пусть M – количество нейронов в уровне с функцией активации *Softmax*, s_j – сигнал активации на j -ом нейроне. Тогда выходом на j -ом нейроне с функцией активации *Softmax* будет $f_j(s_1, \dots, s_M)$:

$$f_j(s_1, \dots, s_M) = \frac{e^{s_j}}{\sum_{k=1}^M e^{s_k}}, j = 1, \dots, M. \quad (6)$$

Функция *Softmax* принимает вектор произвольных реальных значений и сжимает его до вектора значений между нулем и единицей.

1.3.2. Процесс обучения

После инициализации необходимо скомпилировать и обучить модель. Аргументами метода *compile* являются: функция потерь, оптимизатор и метрика. Для задач классификации используют различные функции потерь. Поскольку в нашем исследовании используется бинарная система маркировки, была использована *BinaryCrossentropy*, и, соответственно, в качестве метрики – *BinaryAccuracy*. В качестве оптимизатора использован *Adam*, который является одним из лучших среди адаптивных оптимизаторов.

Обучение модели задается методом *fit*, основными аргументами данного метода являются: массивы входных данных и целевых меток, количество экземпляров входных данных на одно обновление параметров ($\text{batch}_{\text{size}}$) и количество эпох обучения (*epochs*). В качестве входных данных выступают конфигурации систем 10×10 и 20×20 спинов Изинга, в качестве целевых меток: 0 – если температура конфигурации ниже критической или 1 в противном случае. Гиперпараметры: $\text{batch}_{\text{size}} = 100$ и *epochs* = 6.

Переобучение сети происходит, когда точность результатов на учебной выборке больше точности на тестовой выборке. Для того, чтобы исключить возможность переобучения сети, используется метод *Dropout*, который исключает нейроны из сети с заданной вероятностью p и они не вносят вклад в дальнейшее обучение сети. Таким образом, получается одна из возможных 2^N структур связей между нейронами, где N – суммарное число нейронов [18; 21].

2. Результаты и обсуждение

В ходе исследования были проверены различные наборы входных данных нейронной сети, полученные при различных параметрах работы алгоритма Метрополиса для систем 10×10 и 20×20 спинов Изинга, для выбора оптимальных параметров моделирования, которые будут

в дальнейшем применяться при изучении более сложных спиновых систем. Проведен сравнительный анализ с результатами МК-моделирования и точным решением Онзагера.

На рис. 3, *а, б* представлены результаты применения свёрточной нейронной сети к вычислению критической точки T_c в сравнении с точным решением Онзагера и результатами МК-моделирования. На первом этапе сеть обучалась на спиновых конфигурациях, полученных в ходе МК-моделирования со следующими параметрами: размер системы: 10×10 $T = 0,1 \dots 5,0$ с шагом 0,01, число МК-шагов для предварительного уравнивания системы: 10000, число МК-шагов для расчета термодинамических средних в алгоритме Метрополиса: 10000, размер выборки конфигураций для обучения сети: 50 на один шаг по температуре, результаты представлены на рис. 3, *а*. При этом в качестве функции активации в нейронной сети, был построен график сигмоиды: $f(s) = 1/(1 + \exp(-s))$ на котором можно увидеть, как обучалась сеть на данных, полученных ниже и выше области критической температуры, соответственно. На рис. 3, *б* показан результат анализа более «грубых» входных данных: шаг по $T = 0,1$, а число МК-шагов было сокращено до 1000 при прочих одинаковых параметрах моделирования. Как видно из графиков, оценка T_c для алгоритма Метрополиса ухудшилась с уменьшением числа МК-шагов и увеличением шага по температуре. На результаты работы нейронной сети это не повлияло.

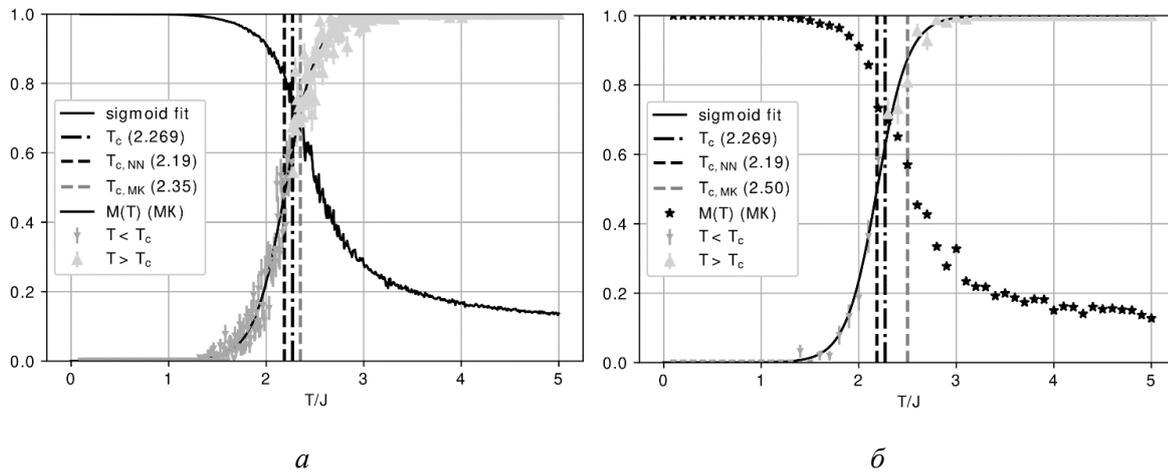


Рис. 3. Результаты расчетов T_c различными методами для системы 10×10 спинов Изинга:
а – шаг по $T = 0,01$, число МК-шагов равно 10000; *б* – шаг по $T = 0,1$, число МК-шагов равно 1000

Также было проверено влияние размера системы на результат работы сети, на примере системы 20×20 . В ходе моделирования также были использованы различные параметры для МК-моделирования, аналогично описанию, приведенному выше: изменялась величина шага по T и число МК-шагов. Полученные результаты в целом аналогичны приведенным выше. Стоит отметить, что увеличение размера системы положительно повлияло на результаты МК-моделирования за счет уменьшения влияния размерного эффекта при расчетах критической температуры: $T_c = 2,29$, но существенно не отразилось на результатах работы нейронной сети – предсказанное значение точки Кюри составило $T_c = 2,21$. Однако, в некоторых численных экспериментах отклонение получаемых значений критической точки от точного решения Онзагера $T_c^J = 2.269$ увеличились, так как обучение нейронной сети строится на вероятностном подходе. Также можно отметить, что авторы не зафиксировали существенной разницы между обучением сначала на точных данных, а потом проверки на более грубых, и наоборот. Результаты в обоих случаях были примерно одинаковы. Увеличение размера выборки и для обучения, и для тестирования также сильно не повлияли на качество работы свёрточной нейронной сети.

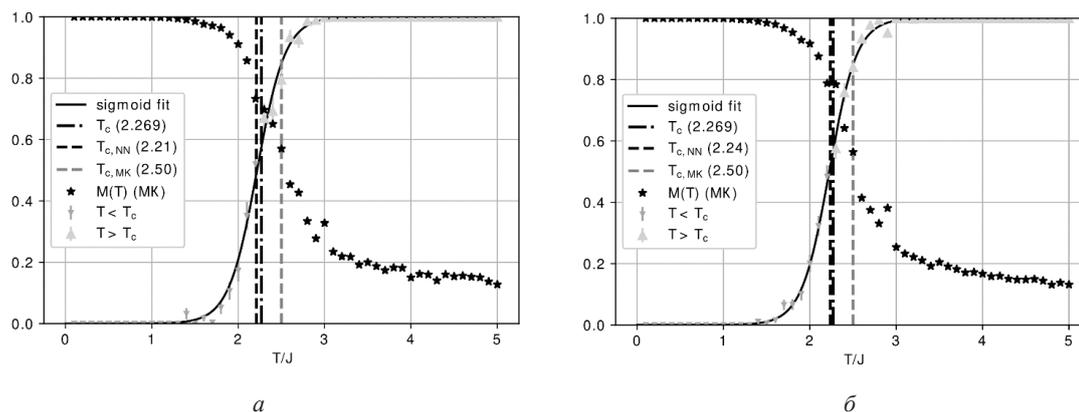


Рис. 4. Результаты расчетов T_C различными методами для системы 10×10 спинов Изинга: a – выборка равна 50; b – выборка равна 100

С точки зрения дальнейшего использования нейронных сетей при анализе спиновых систем, заслуживающий внимания результат был зафиксирован, когда сеть обучалась на «грубых» данных, аналогичных для случая описанного на рис. 3, b с числом выборки 50. А вот тестирование проводилось на увеличенной до 100 образцов выборке. При этом другие параметры МК-моделирования не менялись (см. рис. 4, a , b).

При анализе большей по размеру (чем обучающей) выборки были получены более точные данные (см. рис. 4, b). Уменьшение обучающей выборки также позволило сократить время численных экспериментов. В среднем можно отметить большую точность получаемых результатов по сравнению с Монте-Карло моделированием.

Заключение

В работе было рассмотрено применение нейронных сетей для определения критической температуры фазового перехода II рода в сравнении с известными решениями. Успешно была показана возможность применения сверточных нейронных сетей к задаче классификации спиновых состояний при разных температурах и предсказании точки Кюри в двумерной модели Изинга. Показано влияние количества Монте-Карло шагов и размера выборки на качество обучения сети в сравнении с результатами алгоритма Метрополиса. Рассмотрены системы различных размеров и влияние размерного эффекта на результаты, получаемые нейронной сетью и алгоритмом Метрополиса в сравнении с точным решением Онзагера.

В ходе дальнейших исследований планируется применить нейронные сети к изучению более сложных моделей и решеток, в частности для изучения фрустрированных систем, таких, например, как спиновые стекла.

Список литературы

1. **Cipra B. A.** An introduction to the Ising model // *The American Mathematical Monthly*, 1987, vol. 94. № 10. P. 937–959.
2. **Fisher D. S., Huse D. A.** Ordered phase of short-range Ising spin-glasses // *Physical review letters*, 1986, vol. 56. № 15. P. 1601.
3. **Kruis J., Maris G.** Three representations of the Ising model // *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–11.
4. **Падалко М. А. и др.** Ускоренный алгоритм исчерпывающего перечисления в модели Изинга // *Дальневосточный математический журнал*. 2019. Т. 19. № 2. С. 235–244.

5. **Прудников В. В. и др.** Исследование маргинального влияния дефектов структуры на неравновесное критическое поведение двумерной модели Изинга // *ЖЭТФ*. 2020. Т. 157. № 2. С. 308.
6. **Anderson P. W.** Ordering and antiferromagnetism in ferrites // *Physical Review*, 1956. Vol. 102. No. 4. P. 1008.
7. **Narita N. et al.** Design and numerical study of flux control effect dominant MAMR head: FC writer // *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020. Vol. 57. No. 3. P. 1–5.
8. **Васильев Е. В. и др.** Численное моделирование двумерных магнитных скирмионных структур // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2020. Т. 12. № 5. С. 1051–1061.
9. **Солдатов К. С. и др.** Конечно-размерный скейлинг в ферромагнитных спиновых системах на решетке пирохлора // *Дальневосточный математический журнал*. 2020. Т. 20. № 2. С. 255–266.
10. **Landau D., Binder K.** *A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics*. Cambridge university press, 2003.
11. **Шаповалова К. В. и др.** Зачем суперкомпьютер Дальневосточному федеральному университету? // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 1. С. 81–87.
12. **Шаповалова К. В. и др.** Методы канонического и мультиканонического семплирования пространства состояний векторных моделей // *Дальневосточный математический журнал*. 2017. Т. 17. № 1. С. 124–130.
13. **Макаров А. Г. и др.** К численному расчету фрустраций в модели Изинга // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2019. Т. 110. № 10. С. 700–705.
14. **Carrasquilla J., Melko R.G.** Machine learning phases of matter // *Nature Physics*, 2017. Vol. 13. No. 5. Pp. 431–434.
15. **Kenta S., et al.** Machine-Learning Studies on Spin Models // *Scientific reports*, 2020. Vol. 10. No. 1. Pp. 1–6.
16. **Onsager L.** A Two-Dimensional Model with an Order-Disorder Transition // *Phys. Rev.*, 1944, vol. 65. pp. 117–149.
17. **Капитан В. Ю., Шевченко Ю. А., Андрущенко П. Д., Нефедев К. В.** Суперкомпьютерное моделирование и численные решения задач статфизики, Изд-во ДВФУ, Вл-к. 2017. 195 с.
18. **Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** *Deep learning*. MIT press, 2016.
19. **LeCun Y. et al.** Handwritten digit recognition with a back-propagation network // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 1989. Pp. 396–404.
20. **LeCun Y. et al.** Gradient-based learning applied to document recognition // *Proceedings of the IEEE*, 1998. Vol. 86. No. 11. Pp. 2278–2324.
21. **Abadi M. et al.** Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems // *arXiv preprint arXiv.*, 2016, p. 1603.04467.
22. **Glorot X., Bordes A., Bengio Y.** Deep sparse rectifier neural networks // *Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics*. – JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2011. Pp. 315–323.

References

1. **Cipra B.A.** An introduction to the Ising model // *The American Mathematical Monthly*, 1987, vol. 94, no. 10, pp. 937–959.
2. **Fisher D. S., Huse D. A.** Ordered phase of short-range Ising spin-glasses // *Physical review letters*, 1986, vol. 56, no. 15, p. 1601.
3. **Kruis J., Maris G.** Three representations of the Ising model // *Scientific reports*, 2016, vol. 6, no. 1, pp. 1–11.

4. **Padalko M. A. et al.** An accelerated exhaustive enumeration algorithm in the Ising model // *Dal'nevostochnyi Matematicheskii Zhurnal [Far Eastern Mathematical Journal]*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 235–244.
5. **Prudnikov V. V. et al.** Marginal Effect of Structural Defects on the Nonequilibrium Critical Behavior of the Two-Dimensional Ising Model // *JETP*, 2020, vol. 130, no. 2, p. 258–273.
6. **Anderson P. W.** Ordering and antiferromagnetism in ferrites // *Physical Review*, 1956, vol. 102, no. 4, pp. 1008.
7. **Narita N. et al.** Design and numerical study of flux control effect dominant MAMR head: FC writer // *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, vol. 57, no. 3, pp. 1–5.
8. **Vasil'ev E. V. et al.** Numerical simulation of two-dimensional magnetic skyrmion structures // *Computer Research and Modeling*, 2020, vol. 12, no. 5, pp. 1051–1061.
9. **Soldatov K. S. et al.** Finite-size scaling in ferromagnetic spin systems on the pyrochlore lattice // *Dal'nevostochnyi Matematicheskii Zhurnal [Far Eastern Mathematical Journal]*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 255–266.
10. **Landau D., Binder K.** A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics. Cambridge university press, 2003.
11. **Shapovalova K. V. et al.** Why does Far East Federal University need supercomputer? // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 81–87. (in Russ.)
12. **Shapovalova K. V. et al.** Methods of canonical and multicanonical sampling of the space of vector models // *Dal'nevostochnyi Matematicheskii Zhurnal*, 2017, vol. 17, no. 1, p. 124–130. (in Russ.)
13. **Makarov A. G. et al.** On the Numerical Calculation of Frustrations in the Ising Model // *JETP Letters*, 2019, vol. 110, no. 10, pp. 702–706.
14. **Carrasquilla J., Melko R.G.** Machine learning phases of matter // *Nature Physics*, 2017, vol. 13, no. 5, pp. 431–434.
15. **Kenta S. et al.** Machine-Learning Studies on Spin Models // *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–6.
16. **Onsager L.** A Two-Dimensional Model with an Order-Disorder Transition // *Phys. Rev.*, 1944, vol. 65, pp. 117–149.
17. **Kapitan V. Yu., Shevchenko Yu. A., Andriushchenko P. D., Nefedev K. V.** Supercomputer modeling and numerical solutions of statistical physics problems. Publishing house of FEFU, Vladivostok, 2017. 195 p.
18. **Goodfellow I., Bengio Y., Courville A.** Deep learning. MIT press, 2016.
19. **LeCun Y. et al.** Handwritten digit recognition with a back-propagation network // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, 1989, pp. 396–404.
20. **LeCun Y. et al.** Gradient-based learning applied to document recognition // *Proceedings of the IEEE*, 1998, vol. 86, no. 11, pp. 2278–2324.
21. **Abadi M. et al.** Tensorflow: Large-scale machine learning on heterogeneous distributed systems // *arXiv preprint arXiv: 1603.04467*, 2016.
22. **Glorot X., Bordes A., Bengio Y.** Deep sparse rectifier neural networks // *Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics. – JMLR Workshop and Conference Proceedings*, 2011, pp. 315–323.

Сведения об авторах

Король Алена Олеговна, магистрант, инженер-исследователь, Департамент теоретической физики и интеллектуальных технологий, Институт наукоёмких технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия)

Нефедев Константин Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, директор, Департамент теоретической физики и интеллектуальных технологий, Институт

научных технологий и передовых материалов, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия)

Капитан Виталий Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Департамент информационной безопасности, Институт математики и компьютерных технологий, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Россия)

Information about the Authors

Alena O. Korol, master, research-engineer, Department of Theoretical Physics and Intelligent Technologies, Institute of High Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Konstantin V. Nefedev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), professor, director, Department of Theoretical Physics and Intelligent Technologies, Institute of High Technologies and Advanced Materials, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Vitalii Yu. Kapitan, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Associate professor, Information Security Department, Institute of Mathematics and Computer Technology, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию 10.03.2021;

одобрена после рецензирования 08.02.2022; принята к публикации 22.06.2022

The article was submitted 10.03.2021;

approved after reviewing 08.02.2022; accepted for publication 22.06.2022

Научная статья

УДК 537.533.7

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29

**Исследование инкремента поперечной неустойчивости
килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения
в терагерцовом ЛСЭ**

**Евгений Сергеевич Сандалов¹, Станислав Леонидович Синицкий¹,
Дмитрий Иванович Сквородин¹, Андрей Васильевич Аржанников¹,
Павел Владимир Логачев¹, Петр Алексеевич Бак¹,
Кирилл Игоревич Живанков¹, Данила Алексеевич Никифоров¹,
Алексей Васильевич Петренко¹, Наум Самуилович Гинзбург¹,
Николай Юрьевич Песков¹, Роман Викторович Протас²**

¹Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

²Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
Снежинск, Россия

¹E.S.Sandalov@inp.nsk.su; ¹S.L.Sinitsky@inp.nsk.su;
¹Skovorodin@inp.nsk.su; ¹A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su;
¹P.V.Logatchov@inp.nsk.su; ¹P.A.Bak@inp.nsk.su;
¹K.I.Zhivankov@inp.nsk.su; ¹D.A.Nikiforov@inp.nsk.su;
¹A.V.Petrenko@inp.nsk.su; ¹ginzburg@appl.sci-nnov.ru;
¹peskov@appl.sci-nnov.ru; ²vniitf@vniitf.ru

Аннотация

В ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ ведутся исследования, направленные на получение в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) пучка релятивистских электронов с энергией до 20 МэВ, током до 2 кА и длительностью до 200 нс при нормализованном эмиттансе около 1000 п-мм-мрад. Генерация электронных пучков с такими параметрами требует тщательного исследования всех основных источников возмущений траекторий электронов пучка, создаваемых различного рода неустойчивостями, возникающими при транспортировке и ускорении сильноточного пучка в ускорительной структуре ЛИУ. Для проведения экспериментальной серии по измерению динамики поперечных колебаний пучка был использован набор быстрых трансформаторов тока, применяемых для регистрации тока пучка и полей мод, возбуждаемых этим пучком в структуре. Данные измерения проведены при прохождении в структуре пучка электронов с энергией 8,5 МэВ и током 1 кА в различных режимах по величине фокусирующих магнитных полей в ЛИУ. В результате проведенных измерений были зарегистрированы колебания электромагнитного поля собственных мод в ускорительных модулях ЛИУ, и была установлена зависимость амплитуды колебаний ЭМ-поля этих мод от номера ускорительного модуля. Эта зависимость была сопоставлена с результатом моделирования динамики развития поперечной неустойчивости в ЛИУ, которое проведено с использованием созданного программного комплекса, что в итоге позволило определить величину инкремента поперечной неустойчивости релятивистского электронного пучка в данных экспериментальных условиях. Исходя из полученных результатов проведен анализ возможности использования пучка, генерируемого ЛИУ, в качестве драйвера ЛСЭ-генератора когерентных импульсов ТГц-излучения в диапазоне частот 0,3–1,2 ТГц с субгигаваттным уровнем мощности.

Ключевые слова

линейный индукционный ускоритель, сильноточный релятивистский электронный пучок, поперечная неустойчивость пучка, ускорительный модуль, дипольные колебания, терагерцовый ЛСЭ

© Сандалов Е. С., Синицкий С. Л., Сквородин Д. И., Аржанников А. В., Логачев П. В.,
Бак П. А., Живанков К. И., Никифоров Д. А., Петренко А. В., Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю.,
Протас Р. В., 2022

Для цитирования

Сандалов Е. С., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И., Аржанников А. В., Логачев П. В., Бак П. А., Живанков К. И., Никифоров Д. А., Петренко А. В., Гинзбург Н. С., Песков Н. Ю., Протас Р. В. Исследование инкремента поперечной неустойчивости килоамперного электронного пучка в ЛИУ для его применения в терагерцовом ЛСЭ // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 16–29. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29

Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL

Evgeniy S. Sandalov¹, Stanislav L. Sinitsky¹,
Dmitrii I. Skovorodin¹, Andrey V. Arzhannikov¹,
Pavel V. Logachev¹, Petr A. Bak¹,
Kirill I. Zhivankov¹, Danila A. Nikiforov¹,
Alexey V. Petrenko¹, Naum S. Ginzburg¹,
Nikolai Yu. Peskov¹, Roman V. Protas²

¹Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
Novosibirsk, Russia

²Russian Federal Nuclear Centre — The All-Russian Research Institute
of Technical Physics named after E. I. Zababakhin
Snezhinsk, Russia

¹E.S.Sandalov@inp.nsk.su; ¹S.L.Sinitsky@inp.nsk.su;
¹Skovorodin@inp.nsk.su; ¹A.V.Arzhannikov@inp.nsk.su;
¹P.V.Logatchov@inp.nsk.su; ¹P.A.Bak@inp.nsk.su;
¹K.I.Zhivankov@inp.nsk.su; ¹D.A.Nikiforov@inp.nsk.su;
¹A.V.Petrenko@inp.nsk.su; ¹ginzburg@appl.sci-nnov.ru;
¹peskov@appl.sci-nnov.ru; ²vniitf@vniitf.ru;

Abstract

The Institute of Nuclear Physics SB RAS in cooperation with the Russian Federal Nuclear Center VNIITF performs a series of researches aimed at acquiring a relative electron beam with energy up to 20 MeV, current up to 2 kA, and duration up to 200 ns at normalized emittance ca. 1000 π -mm-rad in a linear induction accelerator (LIA). In order to generate electron beams with such parameters we require thorough investigation of all main sources of perturbation of electron beam trajectory caused by different instabilities that occur during the transport and acceleration of a high current beam in the accelerating structure of LIA. For the experimental series on measuring the dynamics of transverse oscillation of a beam, we applied a set of fast current transformers which are used for registration of beam current and mode fields caused by this beam in the structure. These measurements were performed for the electron beam with the energy of 8.5 MeV and current of 1 kA going through the structure at different modes of focusing magnetic fields size in LIA. As a result, we registered oscillation of the electromagnetic field of normal modes in the accelerating modules of LIA, as well as we determined the dependence of the oscillation amplitude of these modes' EM field on the number of accelerating module. This dependence was compared with the result of modeling of development dynamics of transverse instability in LIA that was performed using the created program system. This allowed us to determine the size of the increment of transverse instability of a relativistic electron beam under the given experimental conditions. Based on the acquired results, we made the analysis of possibility to use the beam generated in ILA as a driver for the FEL generator of coherent impulses of THz radiation within the frequency range of 0.3–1.2 THz with a sub-gigawatt level of power.

Keywords

linear induction accelerator, high-current relativistic electron beam, transverse beam instability, accelerating module, dipole oscillation, terahertz FEL

For citation

Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I., Arzhannikov A. V., Logachev P. V., Bak P. A., Zhivankov K. I., Nikiforov D. A., Petrenko A. V., Ginzburg N. S., Nikolai Yu. Peskov N. Yu., Protas R. V. Investigation of the Increment of Transverse Instability of a Kiloampere Electron Beam in a Linear Induction Accelerator for Its Use in a Terahertz FEL. Siberian Journal of Physics. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 16–29. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-16-29

Введение

В настоящее время в ИЯФ СО РАН совместно с РФЯЦ ВНИИТФ ведутся интенсивные работы по созданию уникального ускорительного комплекса для генерации сильноточного электронного пучка с параметрами: энергией электронов E_e до 20 МэВ, током I_b до 2 кА, длительностью импульса τ_b до 200 нс и нормализованным эмиттансом на уровне $\sim 1000 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$ [1; 2]. Такие параметры пучка в полной мере сопоставимы с параметрами пучков, генерируемых лучшими зарубежными линейными индукционными ускорителями [3; 4]. Основным отличием нашего ускорительного комплекса от его зарубежных аналогов является использование дискретной магнитной фокусировки пучка посредством коротких линз в отличие от применения непрерывного магнитного поля в абсолютном большинстве других ЛИУ с подобными параметрами. С одной стороны, такой тип фокусировки заметно понижает устойчивость пучка к различным возмущениям, характерным для ЛИУ, но с другой стороны – наряду с простотой конструкции и экономичностью, существенно облегчает процессы настройки орбиты пучка и компенсации несоосностей магнитных полей линз. В этой связи для формирования килоамперных электронных пучков с низким эмиттансом в ЛИУ с дискретной магнитной фокусировкой требуется тщательное исследование различных источников возмущения траектории электронов пучка. В большинстве работ, посвященных проблемам устойчивости пучка в ускорительной структуре ЛИУ, выделяют пять основных источников этих возмущений:

- 1) штопорное движение пучка (corkscrew motion), обусловленное изменением энергии электронов в течение его импульса [5],
- 2) неустойчивость электронного пучка, обусловленная смещением зарядов изображения (Image Displacement Instability) [6],
- 3) ионно-шланговая неустойчивость, обусловленная ионизацией остаточного газа в вакуумной камере при прохождении электронного пучка (Ion-Hose Instability) [7],
- 4) резистивная неустойчивость (Resistive Wall Instability), возникающая в результате воздействия на электронный пучок силы Лоренца со стороны зарядов и токов, индуцируемых пучком в стенках вакуумного канала транспортировки [8],
- 5) поперечная неустойчивость электронного пучка (Beam-Breakup Instability), связанная с возбуждением дипольных мод в полостях ускорительных модулей и приводящая к экспоненциальному росту амплитуды его поперечных колебаний по мере движения пучка в ускорительной структуре ЛИУ [9–12].

Известно, что в режиме работы ЛИУ с большой длительностью импульса тока пучка (более 100 нс) наиболее опасной является именно поперечная неустойчивость, поскольку ее развитие приводит к быстрому росту поперечных колебаний пучка вдоль ускорителя и даже к его частичной потере на стенках канала [12]. Развитие этой неустойчивости имеет резонансный характер и происходит по следующему типичному сценарию [10]. Электронный пучок при движении в ЛИУ, возбуждает собственные дипольные моды в ускорительных модулях ЛИУ, расположенных последовательно друг за другом. В свою очередь, электромагнитные поля этих мод приводят к развитию поперечных колебаний пучка как целого. Амплитуды полей дипольных мод в каждом отдельном ускорительном модуле вначале нарастают по времени, а затем спадают. В то же время, амплитуда поперечных колебаний пучка нарастает приблизительно экспоненциальным образом с увеличением номера ускорительного модуля.

В статье мы рассмотрим основные результаты экспериментальных исследований поперечной неустойчивости длинноимпульсного килоамперного электронного пучка в различных режимах по величине фокусирующих магнитных полей в ЛИУ. Актуальность этих исследований мотивирована тем, что такие электронные пучки могут быть использованы в качестве драйвера для лазера на свободных электронах (ЛСЭ), способного генерировать когерентные импульсы электромагнитного излучения с рекордными значениями импульсной мощности и энергосодержания [13–17]. Проект ЛСЭ на основе электронных пучков, формируемых в ЛИУ, активно развивается в ИЯФ СО РАН в коллаборации с ИПФ РАН. В рамках этого проекта предполагается

реализовать схему ЛСЭ-генератора импульсов когерентного терагерцового излучения в диапазоне частот 0,3–1,2 ТГц с суб-гигаватным уровнем мощности и энергосодержанием ~ 10–100 Дж [13; 14], в котором будет использован пучок с приемлемыми для этого параметрами [18].

При дальнейшем изложении материала статьи мы будем придерживаться следующей последовательности. В разделе 1 приведены общая схема ускорительного комплекса ЛИУ и описание системы формирования интенсивного электронного пучка. Раздел 2 посвящен результатам экспериментов по регистрации амплитуды колебаний электромагнитного поля мод в ЛИУ. Здесь также приведено обсуждение измеренных значений инкрементов поперечной неустойчивости пучка в сопоставлении с их расчетными величинами для различных режимов генерации пучка в ускорительной структуре ЛИУ. В разделе 3 описаны основные элементы ЛСЭ-генератора и их параметры.

1. Общая схема ЛИУ на энергию электронов до 20 МэВ

Общая схема создаваемого ускорительного комплекса ЛИУ представлена на рис. 1. Первичное формирование сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с энергией до 2 МэВ и током до 2 кА осуществляется в инжекторе, который описан в работе [19] под названием ЛИУ-2. Фотография инжектора представлена на рис. 2.

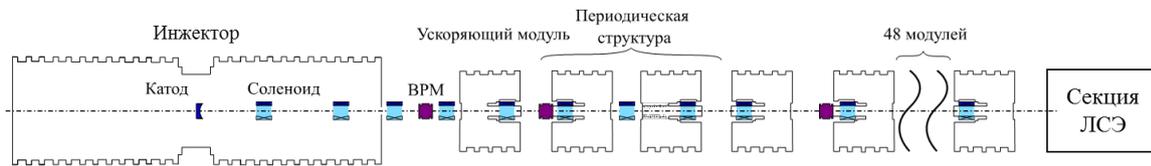


Рис. 1. Схема ЛИУ на энергию 20 МэВ. Черным цветом показаны корпуса ускорительных модулей и инжектора, голубым – фокусирующие магнитные линзы, темно-розовым – датчики положения пучка в канале транспортировки (пикапы). На выходе из ускорительного комплекса схематически показано одно из возможных мест расположения секции ЛСЭ-генератора

Fig. 1. Scheme of the LIA for an energy of 20 MeV. The shells of the accelerator modules and the injector are shown in black, the focusing magnetic lenses are shown in blue, and the beam position monitors (BPM) in the transport channel (pickups) are shown in magenta. One of the possible locations of the FEL generator section is schematically shown at the exit from the accelerator complex

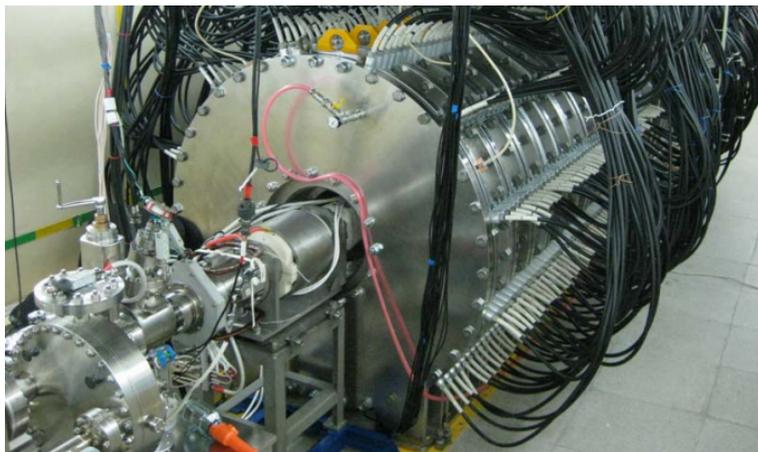


Рис. 2. Фотография инжектора ЛИУ-2, формирующего электронный пучок с током до 2 кА и энергией до 2 МэВ

Fig. 2. Photo of the LIA-2 injector, which forms an electron beam with a current of up to 2 kA and an energy of up to 2 MeV

Формирование РЭП в этом инжекторе осуществляется по следующей схеме. Исходный электронный пучок эмитируется накаливаемым металлопористым катодом диаметром 180 мм. В дальнейшем пучок проходит сквозь анодное отверстие и далее доускоряется внутри ускорительной трубки до энергии 2 МэВ. Прохождение пучка в вакуумной полости инжектора обеспечивается с помощью трех аксиально-симметричных магнитных линз, которые позволяют также согласовать прохождение пучка в инжекторе с последующим его распространением в ускоряющей структуре ЛИУ. Эта ускоряющая структура общей длиной 72 м включает в себя 54 ускорительных модуля, расположенных последовательно друг за другом, и 72 фокусирующих магнитных линзы с максимальной амплитудой индукции поля на оси около ~ 0.25 Тл. Каждый ускорительный модуль способен генерировать на своей оси индукционную ЭДС с амплитудой до 400 кВ, которая обеспечивает ускорение электронов пучка до соответствующей энергии. Подробная геометрия ускорительных модулей и результаты проведенных исследований по улучшению их электродинамических характеристик представлены в работе [20].

Таким образом, ускоряющая структура вместе с инжектором позволяет формировать пучок с энергией электронов до 20 МэВ (в зависимости от числа используемых модулей) и током до 2 кА. Необходимо отметить, что для получения в ЛИУ пучка с низким значением (~ 1000 п·мм·мрад) нормализованного эмиттанса, был осуществлен тщательный подбор полей фокусирующих линз, призванный обеспечить малую величину отношения амплитуды колебаний огибающей пучка к его текущему радиусу, которая не должна превышать 0,1. Полученная таким способом конфигурация фокусирующего магнитного поля задавала плавное уменьшение диаметра электронного пучка с 7 см на входе в ускоряющую структуру до 4 см на ее выходе. После прохождения ускоряющей структуры ЛИУ электронный пучок с помощью системы разводки (см. [21]) направляется в один из двух каналов: прямой или боковой, в которых он может быть использован для различных приложений, в частности, в ЛСЭ-генераторе ТГц излучения.

2. Измерение инкремента поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной фокусировкой

Как уже упоминалось, эффективность применения пучка, генерируемого в ЛИУ, во многих перспективных приложениях существенно зависит от его значений углового и энергетического разбросов электронов. Так, например, при использовании пучка ЛИУ в качестве драйвера для ЛСЭ-генератора эти параметры не должны превышать 50 мрад и $0.01\text{--}0.02 E_e$ для пучка, сжатого до диаметра в несколько миллиметров внутри резонатора ЛСЭ [14; 23]. Очевидно, что развитие поперечной неустойчивости приводит к раскочке поперечных колебаний электронов пучка при движении в ЛИУ и тем самым увеличивает поперечную скорость их паразитного циклотронного вращения в сильном магнитном поле, создаваемом системой компрессии пучка в секции ЛСЭ-генератора. Это паразитное вращение может существенно уменьшить эффективность генерации ТГц излучения, поэтому необходимо подавить или замедлить развитие этой неустойчивости. Различные способы ее подавления уже ранее исследовались во многих зарубежных теоретических и экспериментальных работах, так как эта неустойчивость является одним из самых критических факторов, препятствующих получению длинноимпульсных пучков с токами 1–3 кА и с энергиями электронов от 5 до 20 МэВ [4; 12; 24]. Подобного рода исследования имеют большую актуальность и в настоящее время, в особенности при создании нашего ускорительного комплекса, поскольку характер развития поперечной неустойчивости существенным образом определяется набором индивидуальных факторов: конструкцией ускорительных модулей и ускоряющей системы в целом, конструкцией и настройкой фокусирующей магнитной системы, а также условиями инжекции пучка.

Согласно теоретическим работам, амплитуда колебаний пучка в ЛИУ в результате развития поперечной неустойчивости описывается приближенным выражением, обобщающим теорию Нила-Купера-Холла [10]:

$$\xi_N = \xi_0 \cdot \left[\frac{\gamma_0}{\gamma_N} \right]^{1/2} \exp \left(\frac{I [kA] N Z_{\perp} \left[\frac{\Omega}{m} \right]}{3 \cdot 10^4 \langle B [kG] \rangle} \right), \quad (1)$$

$$Z_{\perp} = c \cdot k \cdot Q, \quad (2)$$

$$k = \frac{(\int B_{\perp} dz)^2}{2U} \quad (3)$$

где ξ_0 – это начальная амплитуда колебаний центроида пучка, N – номер ускорительного модуля, γ_0 и γ_N гамма-факторы пучка на выходе из инжектора и после N -го ускорительного модуля, I – ток пучка, $\langle B \rangle$ – среднее магнитное поле фокусирующей системы, Z_{\perp} – поперечный импеданс ускорительного модуля по отношению к наиболее неустойчивой его дипольной моде, k – коэффициент связи этой моды с пучком, U и Q усредненная по времени энергия этой моды и ее добротность.

Исходя из зависимости показателя экспоненты в выражении (1) от параметров ускорительной структуры ЛИУ, нами были разработаны и исследованы различные модификации конструкции ускорительного модуля ЛИУ для уменьшения добротностей и коэффициентов связи с пучком нескольких дипольных мод, наиболее опасных с точки зрения развития поперечной неустойчивости. Результаты этих исследований, а также модификация конструкции ускорительных модулей путем применения экранирующих электродов, существенно снизивших коэффициент связи с пучком наиболее опасных мод [20], позволили осуществить проводку в 8-ми модульном ЛИУ электронного пучка с током 2 кА и энергией 5 МэВ при уровне поперечных колебаний пучка ~ 0.1 мм.

На следующем этапе развития ЛИУ его ускорительная структура была дополнена до 20 модулей. В отличие от предыдущей 8-ми модульной конфигурации оценки амплитуды колебаний пучка из (1–3) для новой версии ЛИУ показали, что без дополнительных мер по уменьшению инкремента поперечной неустойчивости их уровень будет неприемлем для проводки пучка на всю длину ускорителя. Для получения более точного значения инкремента этой неустойчивости с помощью программного комплекса, описанного в [25], мы осуществили моделирование транспортировки пучка в ЛИУ с учетом его взаимодействия с полями дипольных мод с различными значениями добротностей, задаваемых искусственно в выражении (8) из работы [25] в диапазоне от 10 до 100. Уровень добротности мод $Q \sim 80$ –100 соответствует ускорительному модулю практически без ВЧ-поглотителей за исключением резистивного делителя напряжения, смонтированного на ускорительной трубке, общим сопротивлением ~ 1 кОм. В моделировании использовались заранее рассчитанные пространственные распределения электрических и магнитных полей наиболее опасных дипольных мод в отсутствие поглощения. Транспортировка пучка моделировалась в условиях внешних ускоряющих электрических и фокусирующих магнитных полей с максимальной индукцией на оси магнитных линз 0,04 и 0,08 Тл. Пример расчета полей представлен на рис. 3. Детальное исследование свойств фокусирующей магнитной системы ЛИУ вместе с характерными распределениями ее полей, а также расчетные кривые огибающей пучка в различных случаях представлены в [1].

Помимо моделирования нами была проведена серия экспериментов по транспортировке и ускорению в 20-ти модульном ЛИУ электронного пучка с током 1 кА и энергией 8,5 МэВ на выходе из ускорителя. Для уменьшения инкремента поперечной неустойчивости пучка все модули ЛИУ были оснащены ВЧ-поглотителями в виде вставок из ферритосодержащего материала, расположенных в зазорах между всеми индукторами каждого модуля. По результатам расчетов спектральных свойств таких модулей, а также из холодных измерений добротность наиболее опасных «вакуумных» мод применением указанных ВЧ-поглотителей была снижена до уровня 10–15 для всех мод диапазона 700–850 МГц, описанных в работе [25], кроме моды с частотой 450 МГц, добротность которой составила примерно 30–35. Это обу-

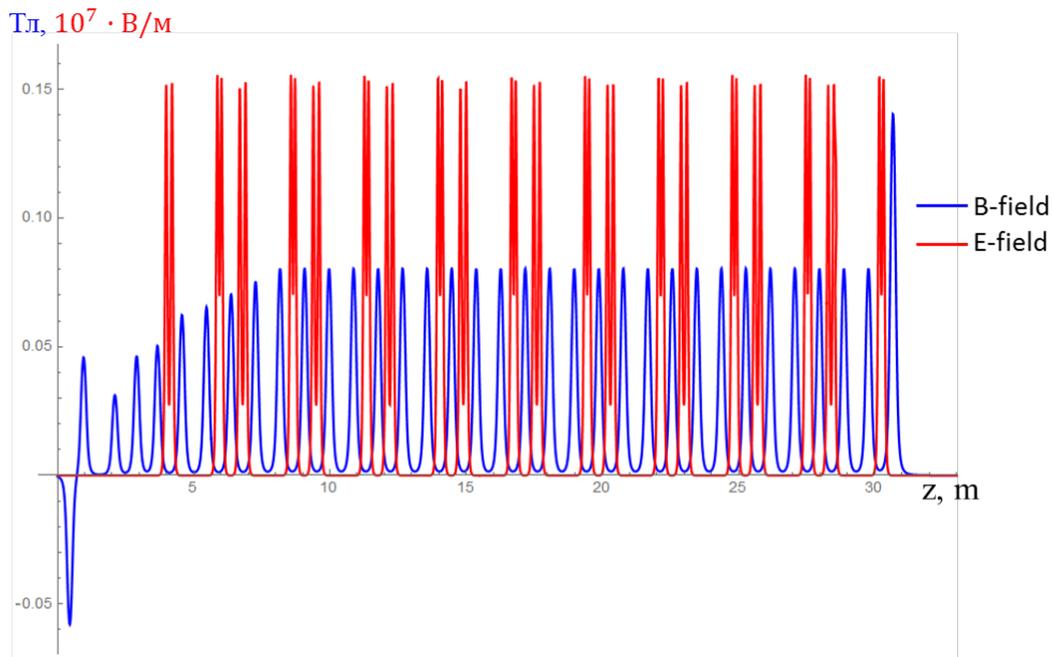


Рис. 3. Пример распределений ускоряющего электрического (красная линия) и фокусирующего магнитного (синяя линия) полей на оси ЛИУ в случае, когда максимальная индукция магнитного поля в линзах средней части ускорителя составляла $B_m = 0.08$ Тл. Старт электронного пучка производился с координаты $Z_0 = 0,7$ м

Fig. 3. The example of the of the accelerating electric (red line) and focusing magnetic (blue line) fields distributions on the LIA axis in the case when the maximum magnetic field induction in the lenses of the middle part of the accelerator was $B_m = 0.08$ T. The start of the electron beam was made from the coordinate $Z_0 = 0.7$ m

словлено тем, что данная мода находилась в технологическом зазоре, в котором ВЧ-поглотители отсутствовали. В проведенной серии экспериментов были зарегистрированы сигналы с быстрых трансформаторов тока в 10 последних модулях, сигналы с которых заметно превышали шумы, определяемые электромагнитными наводками. Как уже упоминалось в [25], осцилляции этих сигналов за вычетом медленной составляющей, обусловленной изменением тока пучка в течение его импульса, пропорциональны полям возбуждаемых пучком дипольных мод ускорительного модуля. Пример одного из таких сигналов, а также его фурье-спектр приведены на рис. 4.

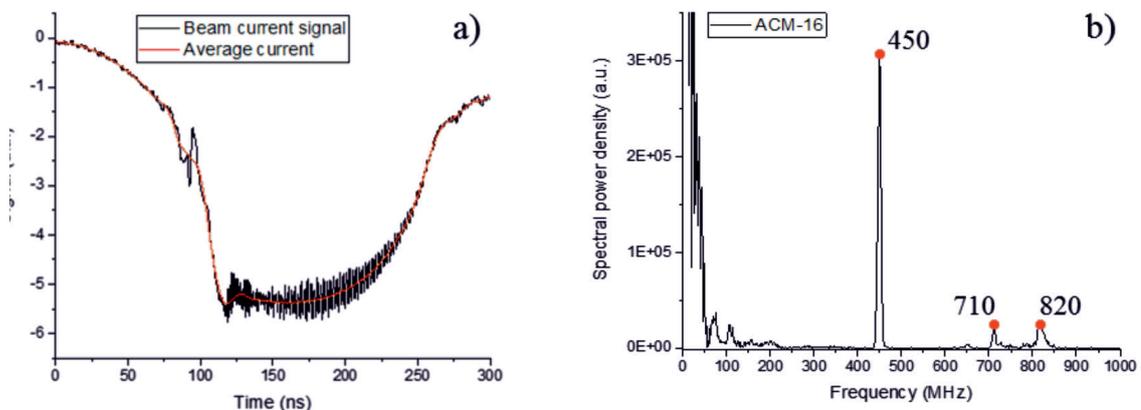


Рис. 4. Сигнал тока пучка с быстрого трансформатора тока, размещенного в 16-м ускорительном модуле ЛИУ (a) и его частотный спектр в линейном масштабе (b)

Fig. 4. Beam current signal from a fast current transformer located in the 16th LIA accelerator module (a) and its frequency spectrum on a linear scale (b)

Как видно из рис. 4, в спектре колебаний преобладает мода с частотой 450 МГц и добротностью $Q \sim 30$, в то время как «вакуумные» моды из диапазона 700–800 МГц оказались существенно подавлены применением ВЧ-поглотителей. Как и в экспериментах с 8-ми модульным ЛИУ [25], добротность вакуумных мод в диапазоне 700–800 МГц ($Q = 15–20$) во время импульса пучка оказалась систематически выше значений, зарегистрированных в холодных экспериментах и моделировании. Для сопоставления экспериментальных и расчетных значений скорости роста амплитуды колебаний на частоте основной дипольной моды 450 МГц был применен следующий алгоритм обработки данных. Поскольку спектр сигнала с трансформатора тока содержал практически одну частоту, то для определения инкремента усиления колебаний полей моды от модуля к модулю мы выбирали максимальную амплитуду колебания сигнала в пределах полочки импульса тока длиной около 100 нс и затем строили зависимость ее логарифма от номера ускорительного модуля. Инкремент усиления колебаний определялся из тангенса угла наклона линейной аппроксимации зависимости этого логарифма от номера ускорительного модуля. Указанные зависимости для разных режимов работы ускорителя приведены на рис. 5 вместе с расчетными Γ_{th} и экспериментальными Γ_{exp} значениями инкремента для двух режимов работы ЛИУ.

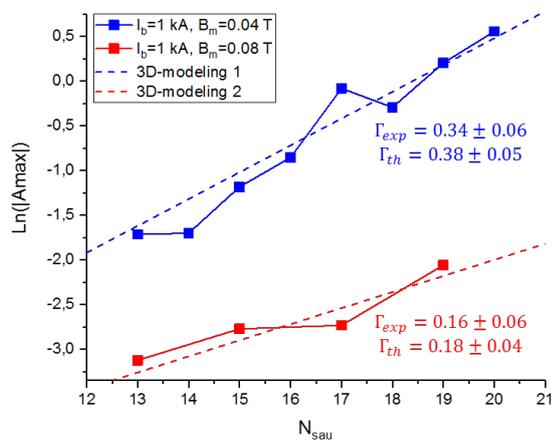


Рис. 5. Зависимости логарифма максимальной амплитуды колебаний полей моды от номера ускорительного модуля в двух режимах работы ЛИУ, в которых ток пучка был одинаковым – 1 кА, а максимальные поля фокусирующих линз различались в два раза: $B_m = 0,04$ и $0,08$ Тл

Fig. 5. The logarithm dependences of the maximum amplitude oscillations of the mode fields on the accelerator module number in two LIA operating modes, in which the beam current was the same – 1 kA, and the maximum fields of the focusing lenses differed by a factor of two: $B_m = 0.04$ and 0.08 T

Как видно из рис. 5, в режиме транспортировки и ускорения пучка с током 1 кА в магнитном поле $B_m = 0,04$ Тл экспериментальное значение инкремента имеет величину $\Gamma_{exp} = 0,34 \pm 0,06$, а теоретическое – $\Gamma_{th} = 0,38 \pm 0,05$, в то время как для режима транспортировки пучка с тем же током в повышенном магнитном поле $B_m = 0,08$ Тл – $\Gamma_{exp} = 0,16 \pm 0,06$ и $\Gamma_{th} = 0,18 \pm 0,04$. Таким образом, двукратное увеличение максимального магнитного поля в линзах средней части ускорителя приводит к уменьшению инкремента усиления колебаний полей основной моды приблизительно в два раза. Помимо этого, в эксперименте и моделировании было зарегистрировано двукратное увеличение инкремента усиления колебаний с ростом тока пучка от 0,5 до 1 кА. Из сопоставления экспериментальных данных и результатов моделирования для всех указанных режимов работы ускорителя наблюдается совпадение экспериментальных и расчетных значений инкрементов в пределах погрешности определения этой величины (15–20%). Таким образом, мы показали, что обобщенное выражение (1), описывающее рост амплитуды колебаний пучка от модуля к модулю в ЛИУ с непрерывным магнитным полем, имеет аналогичную функциональную зависимость от номера ускорительного модуля, величины фокусирующего поля линз и значения тока пучка в случае ЛИУ с дискретной магнитной фокусировкой, что прежде нигде не было продемонстрировано. Полученные зависимости инкремента поперечной неустойчивости от параметров пучка и ускорителя, а также характерное значение начальной амплитуды колебаний пучка $\xi_0 \sim 1$ мкм [25] дают возможность прогнозировать необходимое значение инкремента на уровне $\Gamma \approx 0.15$ для осуществления устойчивой транспортировки пучка на всю длину полномасштабного ЛИУ

из 54 ускорительных модулей, что позволит обеспечить требуемые характеристики пучка в резонаторе проектируемого ЛСЭ-генератора.

3. Общая схема ЛСЭ-генератора ТГц излучения основе пучка, генерируемого в ЛИУ

При разработке и проектировании ЛСЭ систем на базе электронных пучков одной из принципиальных задач является формирование электронного пучка с малыми угловым и энергетическим разбросами электронов, приемлемыми для использования в ЛСЭ ТГц диапазона [23; 26]. Помимо этих требований возникает еще одна задача – осуществление сжатия пучка по сечению от диаметра 4 см до 5–10 мм, который необходим для транспортировки пучка в сверхразмерных электродинамических системах с применением рефлекторов на основе одномерных брэгговских структур [13; 14]. Диаметр таких структур для обеспечения требуемой селекции мод не может превышать 40λ , что в нашем случае соответствует диаметрам 10–40 мм для частот 1.2–0.3 ТГц. Для решения этой задачи мы провели эксперименты по магнитной компрессии килоамперного пучка из ЛИУ с исходного диаметра 40 мм до 10 мм с последующей транспортировкой сжатого пучка в тестовом вакуумном канале секции ЛСЭ длиной 600 мм и диаметром 20 мм [18; 23; 26]. Этот эксперимент продемонстрировал принципиальную возможность реализации проекта ТГц ЛСЭ-генератора на основе пучка ЛИУ с током 1 кА.

После успешной демонстрационной серии экспериментов по компрессии пучка, нами было принято решение о разработке технического проекта ЛСЭ-генератора импульсов когерентного терагерцового излучения в области частот 0.3–1.2 ТГц, длиной импульса ~ 100 нс, электронным КПД $\sim 5\%$ (для 0,3 ТГц), уровнем мощности излучения $\sim 0,1–0,5$ ГВт и энергосодержанием в импульсе $\sim 10–100$ Дж [13; 14]. В качестве первого шага реализации проекта нами была спроектирована секция ЛСЭ, общий вид которой представлен на рис. 6.

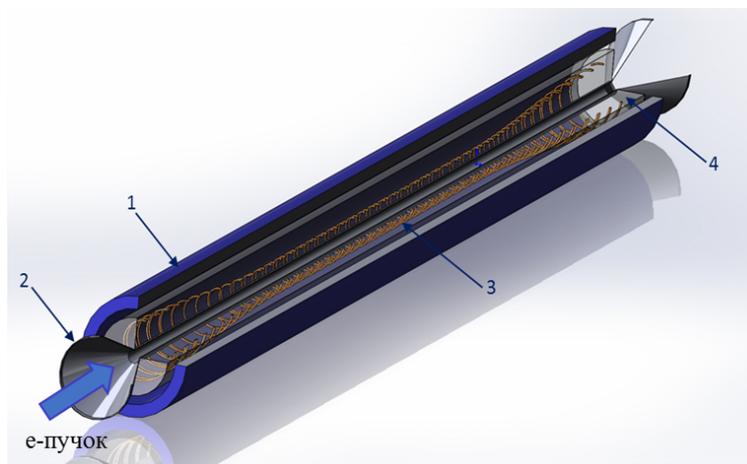


Рис. 6. Схема секции ЛСЭ-генератора с системой магнитной компрессии сечения пучка, ондулятором и вакуумным каналом для прохождения сжатого пучка: 1 – импульсный соленоид для магнитного сжатия сечения пучка, 2 – вакуумный канал для прохождения пучка в ондуляторном поле, 3 – обмотки ондулятора в виде бифилярной спирали, 4 – диэлектрическая основа для фиксации положения обмоток ондулятора. Синей стрелкой показано направление распространения электронного пучка

Fig. 6. FEL-generator scheme with a system of magnetic beam section compression, an undulator and a vacuum channel for the compressed beam transportation: 1 – pulsed solenoid for magnetic compression of the beam cross-section, 2 – vacuum channel, 3- undulator windings in the form of a bifilar spiral, 4 – dielectric base for fixing the undulator windings position. The blue arrow shows the direction of an electron beam propagation.

Секция ЛСЭ включает следующие основные функциональные узлы:

- система магнитной компрессии пучка, состоящая из импульсного магнитного соленоида (1) с длиной 2 м и нескольких согласующих магнитных линз со встроенными дипольными корректорами, расположенными между выходом из ЛИУ и соленоидом (не показаны на рис. 6);
- вакуумный канал (2) из нержавеющей стали с внутренним диаметром регулярной секции 26 мм и длиной ~ 2 м, внутри которого размещается электродинамическая система ЛСЭ-генератора и проходит электронный пучок;
- ондуляторная обмотка (3), создающая винтовое поле для накачки поперечных колебаний электронов пучка.

На выходе пучка из секции ЛСЭ будет установлен узел вывода ТГц излучения в атмосферу, а также размещена система сброса пучка на мишень с последующим эффективным поглощением возникающего при этом потока рентгеновского излучения. Существенное подавление этого потока является необходимым условием возможности регистрации параметров пучка и импульсов ТГц излучения.

Как уже упоминалось ранее, внутри вакуумного канала будет размещена электродинамическая система ЛСЭ-генератора, представляющая собой цилиндрический резонатор, состоящий из двух брэгговских рефлекторов, соединенных регулярным волноводом круглого сечения. Конструктивно каждый рефлектор выполнен из отрезка такого же волновода, но с одномерной гофрировкой внутренней поверхности глубиной от десятков до сотен микрон. Такие структуры получили широкое применение в качестве электродинамических систем мощных релятивистских генераторов микроволнового излучения [27; 28]. В случае использования резонаторов на основе «традиционных» одномерных брэгговских отражателей, осуществляющих отражение бегущей волны непосредственно в волну с противоположным направлением, селективная способность таких резонаторов существенно ухудшается при диаметре волновода, превышающим несколько длин волн (типичный параметр сверхразмерности $\varnothing/\lambda \sim 2-3$). Поэтому для обеспечения селективного возбуждения рабочей волны в ЛСЭ-генераторе в условиях высокой сверхразмерности $\varnothing/\lambda \sim 40$ мы предлагаем использовать в резонаторе так называемые модифицированные брэгговские рефлекторы, отличительной особенностью которых является связь бегущих и квазикритических волн [29; 30] (см. рис. 7). Работоспособность последних резонаторов в диапазоне частот 0.3–0.6 ТГц была продемонстрирована в [31].

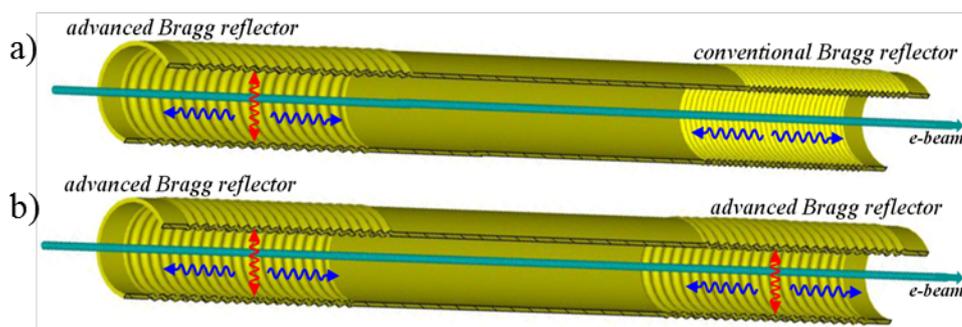


Рис. 7. Схемы цилиндрических резонаторов двух различных типов: (а) комбинированный резонатор на основе модифицированного (входного) и «традиционного» (выходного) брэгговских рефлекторов и (б) резонатор с двумя модифицированными брэгговскими рефлекторами. Зелеными стрелками показано направление распространения электронного пучка, синими и красными стрелками – парциальных продольных и поперечных волновых потоков, соответственно. Параметры «традиционного» брэгговского рефлектора для частоты рабочей волны 0.6 ТГц: отношение его диаметра к длине волны излучения (сверхразмерность) $\varnothing/\lambda \sim 5-7$, длина структуры $l_{ad} = 5$ см, период гофрировки $d_{ad} = 0,25$ мм и глубина гофрировки $r_{ad} = 0,15$ мм. Для модифицированного рефлектора на ту же частоту волны: сверхразмерность $\varnothing/\lambda \sim 40$, $l_{ad} = 7,5$ см, $d_{ad} = 0,5$ мм и $r_{ad} = 0,3$ мм

Fig. 7. The scheme of the cylindrical resonators of two different types: (a) a combined resonator based on an advanced (input) and «traditional» (output) Bragg reflectors and (b) a resonator with two advanced Bragg reflectors. Green arrows show the direction of the electron beam propagation, blue and red arrows – partial longitudinal and transverse wave flows, respectively. The parameters of a «traditional» Bragg reflector for an operating wave frequency of 0.6 THz: the ratio of its diameter to the radiation wavelength $\varnothing/\lambda \sim 5-7$, structure length $l_{ad} = 5$ cm, corrugation period $d_{ad} = 0.25$ mm, and corrugation depth $r_{ad} = 0.15$ mm. For the advanced reflector operated at the same wave frequency: $\varnothing/\lambda \sim 40$, $l_{ad} = 7.5$ cm, $d_{ad} = 0.5$ mm and $r_{ad} = 0.3$ mm

Таким образом, анализ структуры магнитного поля и электродинамической системы ЛСЭ генератора на основе использования сжатого по сечению пучка, генерируемого в ЛИУ, показал соответствие параметров сильноточного РЭП задаче генерации потока ТГц-излучения.

Заключение

В ходе проделанной работы проведены экспериментальные исследования поперечной неустойчивости электронного пучка с током 1 кА и энергией 8,5 МэВ в различных режимах работы 20-ти модульного ЛИУ, в результате которых получены количественные значения инкремента этой неустойчивости. Было продемонстрировано, что разработанный программный комплекс позволяет надежно моделировать динамику возбуждения и развития поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ, а также рассчитывать значение инкремента усиления колебаний центроида пучка от модуля к модулю. Продemonстрировано, что расчетное и экспериментальное значения инкремента совпадают в пределах его ошибки измерения, которая имеет величину 20%. Кроме того, в экспериментальной серии было установлено и подтверждено моделированием, что инкремент поперечной неустойчивости пучка в ЛИУ с дискретной фокусировкой приближенно пропорционален току пучка и обратно пропорционален характерному магнитному полю линз в ускорителе. Результаты проведенных исследований показали, что 20-ти модульная конфигурация ЛИУ позволяет получить параметры пучка, приемлемые для генерации потока терагерцового излучения с субгигаваттным уровнем мощности.

Благодарности

Основная доля исследований проведена в ИЯФ СО РАН: работы, описанные в разделе 3, частично выполнены за счет средств гранта Российского научного фонда (грант № 19-12-00212). Эксперименты по генерации в ЛИУ пучка электронов с током 1 кА энергией 8,5 МэВ проводились в коллаборации с РФЯЦ ВНИИТФ.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. В. Бурдакову, Н. А. Винокурову, В. Н. Волкову и Е. К. Кенжебулатову за полезные замечания и обсуждения в ходе проведения исследований.

Список литературы / References

1. **Nikiforov D. A., Blinov M. F., Fedorov V. V. et al.** High-Current Electron-Beam Transport in the LIA-5 Linear Induction Accelerator. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 17, 2020, p. 197–203. DOI 10.1134/S1547477120020156.
2. **Sinitsky S. L., Sandalov E. S., Skovorodin D. I. et al.** High Current Electron Beam Transport and Focusing at the Linear Induction Accelerator. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, 2020, p. 191. DOI 10.1109/ICOPS37625.2020.9717608.
3. **Ekdahl C.** Modern electron accelerators for radiography, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2002, vol. 30, no. 1, p. 254–261.
4. **Takayama K., Briggs R.** Induction accelerators. *Berlin Heidelberg: Springer*, 2011.

5. **Ekdahl C.** Electron-Beam Corkscrew Motion in an Advanced Linear Induction Accelerator. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 11, p. 3548–3553. DOI 10.1109/TPS.2021.3120877.
6. **Godfrey B. B., Hughes T. P.** Beam-breakup and image-displacement instability coupling impedances in high-current electron-beam induction accelerators. *Proceedings of the 1989 IEEE Particle Accelerator Conference. Accelerator Science and Technology*, 1989, vol. 2, p. 1023–1025. DOI 10.1109/PAC.1989.73341.
7. **Ekdahl C.** The Ion-Hose Instability in a High-Current Multipulse Linear Induction Accelerator. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, vol. 47, no. 1, p. 300–306. DOI 10.1109/TPS.2018.2872472.
8. **Ekdahl C.** The Resistive-Wall Instability in Multipulse Linear Induction Accelerators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, vol. 45, no. 5, p. 811–818. DOI 10.1109/TPS.2017.2681040.
9. **Panofsky W. K. H., Bander M.** Asymptotic theory of beam breakup in linear accelerators. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, vol. 39, p. 206–212.
10. **Neil V. K., Hall L. S., Cooper R. K.** Further theoretical studies of the beam breakup instability. *Particle Accel.*, 1979, vol. 9, no. 4, p. 213–222.
11. **Лебедев А. Н., Шальнов А. В.** Основы физики и техники ускорителей, 2-е изд., перераб. и доп. Энергоатомиздат, 1991. 528 с.
12. **Ekdahl C., Coleman J. E., McCuistian B. T.** Beam breakup in an advanced linear induction accelerator. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, vol. 44, no. 7, p. 1094–1102. DOI 10.1109/TPS.2016.2571123.
13. **Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Malkin A. M. et al.** Powerful Long-Pulse THz-Band Bragg FEL Based On Linear Induction Accelerator. *44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2019, p. 1–2. DOI 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874573.
14. **Peskov N. Yu., Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S. et al.** Project of powerful long-pulse Bragg FEL of sub-THz to THz band: design, simulations and components testing. *Proc. SPIE 11582, Fourth International Conference on Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection, and Applications, 2020*. DOI 10.1117/12.2579554.
15. **Tan P., Huang J., Liu K. et al.** Terahertz radiation sources based on free electron lasers and their applications. *Science China Information Sciences*, 2012, p. 1–15. DOI 10.1007/s11432-011-4515-1.
16. **Shevchenko O. A., Arbuzov V. S., Vinokurov N. A. et al.** The Novosibirsk Free Electron Laser – Unique Source of Terahertz and Infrared Coherent Radiation. *Phys. Procedia*, 2016, p. 13–18. DOI 10.1016/j.phpro.2016.11.004.
17. **Gallerano G. P. et al.** The physics of and prospects for THz-compact FELs. *Terahertz Science and Technology*, 2014, vol. 7, no. 4, p.160.
18. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al.** Studies on Electron Beam Transport in a Linear Induction Accelerator for Free Electron Laser Application. *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, 2021 p. 1–1. DOI 10.1109/ICOPS36761.2021.9588436.
19. **Logachev P., Kuznetsov G., Korepanov A. et al.** LIU–2 linear induction accelerator. *Instrum. Experim. Techn.*, 2013, vol. 56, no. 6, p. 672–679. DOI 10.1134/S0020441213060195.
20. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al.** Electrodynamic System of the Linear Induction Accelerator Module. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 2, p. 718–728. DOI 10.1109/TPS.2020.3045345.
21. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Skovorodin D. I. et al.** Emittance Variation of a High-Current Relativistic Electron Beam in a Bend Magnet. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, vol. 49, no. 9, p. 2737–2749. DOI 10.1109/TPS.2021.3105661.
22. **Lee E. P.** Cancellation of the centrifugal space charge force. *Part. Accel.*, 1990, vol. 25, p. 241.

23. **Nikiforov D. A., Petrenko A. V., Sinitsky S. L. et al.** Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source. *Journal of Instrumentation*, 2021, vol.16, P. 11024. DOI 10.1088/1748-0221/16/11/P11024.
24. **Ekdahl C. et al.** Long-pulse beam stability experiments on the DARHT-II linear induction accelerator, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 34, 2006, p. 460–466.
25. **Сандалов Е. С., Сеницкий С. Л., Сквородин Д. И. и др.** Исследование поперечной неустойчивости сильнооточного релятивистского электронного пучка в линейном индукционном ускорителе // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 1. С. 5–22. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-1-5-22.
26. **Sandalov E. S., Sinitsky S. L., Nikiforov D. A. et al.** Theoretical and Experimental Studies on Compression and Transport of an Intense Electron Beam in the Channel of sub-mm FEL. 46th *International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMWTHz)*, 2022, p. 1–2. DOI 10.1109/IRMMW-THz50926.2021.9567073.
27. **Ковалев Н. Ф., Орлова И. М., Петелин М. И.** // Изв. ВУЗов: Радиофизика. 1968. Т. 11, № 5. С.783–786.
28. **Bratman V. L., Denisov G. G., Ginzburg N. S., Petelin M. I.** // *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983. V. QE-19, no. 3, p. 282–296. DOI 10.1109/JQE.1983.1071840.
29. **Гинзбург Н. С., Малкин А. М., Песков Н. Ю., Сергеев А. С.** // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 20. С. 60–69. DOI 10.1134/S1063785006100245.
30. **Arzhannikov A. V., Ginzburg N. S., Kalinin P. V. et al** // *Appl. Phys. Lett.*, 2012. V. 101, P. 083507. DOI 10.1063/1.4747149.
31. **Песков Н. Ю., Гинзбург Н. С., Заславский В. Ю. и др.** Мощный длинноимпульсный брегговский ЛСЭ суб-ТГц/ТГцдиапазона: разработка и тестирование электродинамической системы // VII Всероссийская микроволновая конференция: сборник трудов, 2020. С. 72 – 76.

Сведения об авторах

Сандалов Евгений Сергеевич, аспирант, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сеницкий Станислав Леонидович, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Сквородин Дмитрий Иванович, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Аржанников Андрей Васильевич, доктор физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Логачев Павел Владимир, доктор физико-математических наук, академик РАН, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Бак Петр Алексеевич, старший научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Живанков Кирилл Игоревич, научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Никифоров Данила Алексеевич, научный сотрудник, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Петренко Алексей Васильевич, кандидат физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Гинзбург Наум Самуилович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Песков Николай Юрьевич, доктор физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск, Россия)

Протас Роман Викторович, кандидат физико-математических наук, Российский Федеральный Ядерный Центр-Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е. И. Забабахина (Снежинск, Россия)

Information about the Authors

Evgeniy S. Sandalov, postgraduate student, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Stanislav L. Sinitsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Dmitrii I. Skovorodin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Andrey V. Arzhannikov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Pavel V. Logachev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the Russian Academy of Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Petr A. Bak, Senior Researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Kirill I. Zhivankov, researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Danila A. Nikiforov, researcher, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexey V. Petrenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Naum S. Ginzburg, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Nikolai Yu. Peskov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Budker Institute of Nuclear Physics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences (BINP SB RAS) (Novosibirsk, Russian Federation)

Roman V. Protas, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Russian Federal Center-All-Russian Research Institute of Technical Physics named E.I. Zababakhin (Snezhinsk, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию 29.05.2022;

одобрена после рецензирования 20.06.2022; принята к публикации 22.06.2022

The article was submitted 29.05.2022;

approved after reviewing 20.06.2022; accepted for publication 22.06.2022

Научная статья

УДК 532.526

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40

**Экспериментальное исследование влияния пары
слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход
в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2**

**Марина Владимировна Питеримова¹, Александр Дмитриевич Косинов²,
Николай Васильевич Семёнов³, Алексей Анатольевич Яцких⁴,
Василий Леонидович Кочарин⁵, Юрий Геннадьевич Ермолаев⁶**

¹⁻⁶Институт теоретической и прикладной механики им С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

¹piterimova@itam.nsc.ru; ²kosinov@itam.nsc.ru;

³semion@itam.nsc.ru; ⁴73.yatskikh@gmail.com;

⁵kocharin1208@gmail.com; ⁶yermol@itam.nsc.ru

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование влияния продольных вихрей, порождаемых слабыми ударными волнами, на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2. Для усиления эффекта порождения продольных вихрей использована модель с радиусом притупления передней кромки 0,5 мм. Измерения интенсивности возмущений проводились термоанемометром постоянного сопротивления и однопиточным датчиком. Для изменения чисел Рейнольдса в потоке использовался метод варьирования давления в форкамере сверхзвуковой аэродинамической трубы. По условиям экспериментов уровень возмущений массового расхода в рабочей части Т-325 ИТПМ СО РАН не превышал 0,1 % от величины среднего течения в диапазоне частот от 0,2 до 50 кГц. В данной работе впервые получено, что стационарные продольные вихри, возникающие в пограничном слое плоской пластины в результате воздействия пары слабых ударных волн на ее переднюю кромку, приводят к раннему ламинарно-турбулентному переходу при разных числах Рейнольдса. В случае однородного пограничного слоя переход достигается при $Re_x \approx 3,1 \times 10^6$, а при измерениях в области вихрей от ударных волн при значениях $Re_x \approx 1,5 \times 10^6$ и $Re_x \approx 2 \times 10^6$.

Ключевые слова

сверхзвуковой поток, экспериментальные исследования, плоская пластина, ламинарно-турбулентный переход

Для цитирования

Питеримова М. В., Косинов А. Д., Семёнов Н. В., Яцких А. А., Кочарин В. Л., Ермолаев Ю. Г. Экспериментальное исследование влияния пары слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое плоской пластины при числе Маха 2 // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 30–40. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40

**Experimental study of effect of a pair of weak shock waves
on laminar-turbulent transition in the boundary layer of flat plate
at Mach number 2**

**Marina V. Piterimova¹, Alexander D. Kosinov²,
Nikolay V. Semionov³, Aleksey A. Yatskikh⁴,
Vasily L. Kocharin⁵, Yuri G. Yermolaev⁶**

¹⁻⁶S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics
Novosibirsk, Russian Federation

¹piterimova@itam.nsc.ru; ²kosinov@itam.nsc.ru;

³semion@itam.nsc.ru; ⁴73.yatskikh@gmail.com;

⁵kocharin1208@gmail.com; ⁶yermol@itam.nsc.ru

Abstract

An experimental study of the effect of longitudinal vortices generated by weak shock waves on the laminar-turbulent transition in the boundary layer of a flat plate at a Mach number 2 is conducted. To amplify the effect of the longitudinal

© Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Kocharin V. L., Yermolaev Yu. G., 2022

vortices generation, a model with leading edge blunting radius of 0,5 mm was used. The disturbance intensity was measured with a constant temperature hotwire anemometer and a single-wire sensor. To change the Reynolds numbers in the flow, the method of varying the pressure in the pretest section of a supersonic wind tunnel was used. According to the experimental conditions, the level of mass flow perturbations in the test section T325 of ITAM SB RAS did not exceed 0,1 % of the mean flow in the frequency range from 0,2 to 50 kHz. In this work, it is obtained for the first time that stationary streamwise vortices that arise in the boundary layer of a flat plate because of the action of a pair of weak shock waves on its leading edge lead to an early laminar-turbulent transition at different Reynolds numbers. In the case of a homogeneous boundary layer, the transition is achieved at $Re_x \approx 3,1 \times 10^6$, and in measurements in the region of vortices from shock waves at $Re_x \approx 1,5 \times 10^6$ and $Re_x \approx 2 \times 10^6$.

Keywords

supersonic flow, experimental studies, flat plate, laminar-turbulent transition

For citation

Piterimova M. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Kocharin V. L., Yermolaev Yu. G. Experimental study of effect of a pair of weak shock waves on laminar-turbulent transition in the boundary layer of flat plate at Mach number 2. *Siberian Journal of Physics*. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 30–40. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-30-40

Введение

На протяжении двух последних десятилетий проявляется интерес исследователей к изучению введения в поток продольных вихревых возмущений с целью затягивания ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое на моделях, обтекаемых возмущенным потоком. Известно, что присутствие турбулентности набегающего потока может спровоцировать ранний переход [1–5]. Несмотря на сложность этого процесса, с помощью специально подобранных характеристик продольных вихрей удастся замедлить возникновение турбулентного течения и в данных условиях [6]. До недавнего времени исследования проводились в основном при дозвуковых скоростях потока. Отметим, что возмущение среднего течения квазистационарными продольными вихрями может изменить механизмы перехода. Амплитуда продольных возмущений хотя и не растет вниз по потоку, но вследствие разрушения образовавшихся при этом турбулентных пятен в пограничном слое происходит переход от ламинарного течения в турбулентное [4]. Эксперименты, проводимые в контролируемых условиях, позволяют исследовать эволюцию вводимых возмущений [4; 7; 8].

Исследования при сверхзвуковых скоростях потока начались относительно недавно. В [9] исследована генерация возмущений двумерной неровностью с поверхности стенки рабочей части сверхзвуковой аэродинамической трубы. Исследования проводились на моделях плоских пластин с острой и притупленной передней кромкой при числе Маха 2,5. По условиям экспериментов получено, что двумерные неровности на поверхности рабочей части аэродинамической трубы генерируют в свободном потоке возмущения в виде N-волны, которые при попадании на переднюю кромку плоской пластины порождают в пограничном слое продольные стационарные возмущения. Измерения показали, что при использовании затупленной пластины интенсивность этих возмущений в несколько раз превосходит интенсивность, полученную при использовании модели с острой передней кромкой.

Теоретически явление порождения в пограничном слое стационарных продольных возмущений N-волной изучалось в [10; 11]. В исследованиях [11] получено, что возмущение, генерируемое передним фронтом N-волны, приводит к смещению начала ламинарно-турбулентного перехода вверх по потоку, в то время как возмущение от заднего фронта N-волны на положения начала перехода влияния не оказывает.

Последующие эксперименты [12] позволили начать изучение влияния продольных стационарных вихрей на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины. Однако, экспериментальные данные, полученные ранее, показали, что в измерениях переход не был достигнут. В данной работе впервые удалось экспериментально оценить числа Рейнольдса перехода в области развития пары продольных вихрей в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины в аналогичной постановке.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования при числе Маха 2 проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН, которая укомплектована автоматизированной системой измерения параметров потока и универсальными измерительными программами, написанными в LabVIEW [13]. Использовалась модель плоской стальной пластины длиной 395 мм, шириной 200 мм и толщиной 10 мм. Радиус притупления передней кромки пластины r был равен 0,5 мм. Термоанемометр постоянного сопротивления (СТА2017_2 [14; 15]) с 250мным резистором номиналом 25 Ом в измерительном плече использовался для измерения среднего E и пульсационного $e'(t)$ напряжения на одноточечном датчике. Фактически это отражало зависимости среднего и пульсирующего массового расхода в сверхзвуковом течении. Возмущения массового расхода рассчитывались согласно формуле: $m'(t) = \frac{e'(t)}{S_{\rho U E}}$, где $S_{\rho U E}$ – коэффициент чувствительности датчика термоанемометра к пульсациям массового расхода. Толщина вольфрамовой нити датчика составляла 10 мкм, а длина – 1,5 мм. Значение перегрева нити задавалось равным 0,8, поскольку при таком значении перегрева датчик термоанемометра чувствителен к колебаниям массового расхода и практически не воспринимает изменение температуры торможения. Датчик ТПС присоединялся к штанге координатного устройства с возможностью передвижения в трех направлениях: в направлении по потоку (ось x), поперек потока (ось z) и по вертикали (ось y). Измерения проводились в максимуме пульсаций по пограничному слою. Цифровой мультиметр Agilent 34401А использовался для измерения напряжения E с выхода термоанемометра. Пульсационная составляющая напряжения оцифровывалась 12-разрядным аналогоцифровым преобразователем (АЦП) с частотой дискретизации 750 кГц. Длина одной цифровой осциллограммы составляла 65536 точек. В каждом измерении делалось по 4 повтора. В процессе обработки данных анализировались как результаты, полученные в каждой реализации, так и осредненные по 4 реализациям. Методика измерения и обработки экспериментальных данных более подробно описана в [13; 16].

С учетом первого опыта измерений перехода в сверхзвуковом пограничном слое на данной модели плоской пластины [12] выполнены эксперименты, близкие по постановке к [12]. Использовалась клейкая ленточка для генерации в свободный поток Т325 N-волны со стенки рабочей части близких размеров и режимы работы установки, при которых определялись характеристики, порожденных в пограничном слое продольных вихрей. Аналогично работе [12] для изменения чисел Рейнольдса в потоке использовался метод варьирования давления в форкамере сверхзвуковой аэродинамической трубы. Отметим, что характеристики N-волн были также близкими. Для изучения воздействия продольных вихрей, порожденных слабыми ударными волнами в пограничном слое модели, на ламинарнотурбулентный переход были выполнены измерения амплитуды пульсаций при различных единичных числах Рейнольдса Re_1 для случая однородного и возмущенного продольными вихрями пограничного слоя. Максимальный диапазон изменения единичных чисел Рейнольдса был от 5×10^6 до 25×10^6 m^{-1} . Положение датчика в ходе эксперимента оставалось постоянным. Измерения проводились при $x = 120$ мм. Числа Рейнольдса рассчитывались по формуле ($Re_x = x \frac{U_{\infty}}{\nu_{\infty}} = x \times Re_1$).

Схематичное представление постановки эксперимента и фото рабочей части с установленной моделью представлены на рис. 1, *a* и *б* соответственно. Генерация слабых ударных волн производилась с помощью клейкой ПВХленты шириной 2,5 мм, толщиной 130 мкм и длиной около 150 мм (2D на рис. 1). Наклейка размещалась на поверхности стенки рабочей части аэродинамической трубы на расстоянии L от передней кромки. Расстояние L было рассчитано так, чтобы волны воздействовали приблизительно на центральную область передней кромки пластины.

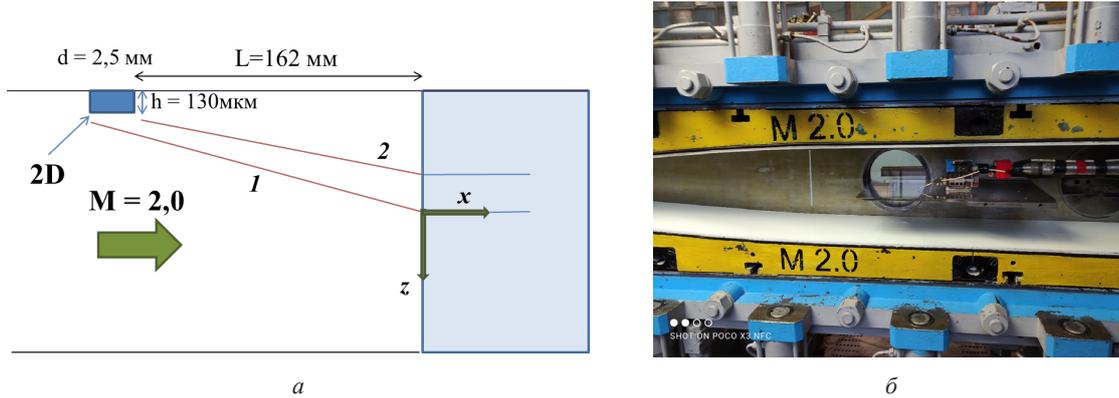


Рис. 1. Схема эксперимента (а) и фотография модели плоской пластины и генератора слабых ударных волн в рабочей части Т-325 (б)

Fig. 1. Experimental set up (a) and a photo of a flat plate model and a weak shock wave generator in the test chamber of T-325 (b)

Результаты и их анализ

На рис. 2 приведены распределения искажения среднего течения в зависимости от поперечной координаты z при $x = 120$ мм. Данные на рис. 2, а соответствуют результатам, описанным в [12], и переобработаны в соответствии с методикой, используемой для получения аналогичной зависимости (рис. 2, б) в этой работе. Относительная величина искажения среднего течения рассчитывалась по формуле (1), которая соответствует методу работы [17]:

$$\frac{\Delta(\rho U)}{\rho U} = 4 * \frac{\Delta E}{E} \quad (1)$$

Однако фактическая реализация этого метода соответствовала соотношению (2), где z_0 выбрано таким образом, что $\Delta(\rho U)(z_0) = 0$.

$$\frac{\Delta(\rho U)}{\rho U} = 4 * \frac{E(z_i) - E(z_0)}{E(z_0)} * 100\% \quad (2)$$

Для результатов, приведенных на рис. 2: $z_0 = -20$ мм.

Сравнивая данные, представленные на рис. 2, а и б, можно отметить, что в экспериментах положение вихрей по координате z , а также их амплитуды приблизительно одинаковы. В обоих случаях наиболее интенсивный вихрь порождается волной 1, а менее интенсивный – волной 2 (рис. 1, а). Область воздействия вихрей по ширине модели по результатам проведенных вновь экспериментов также не изменилась. Основное различие рис. 2, а и рис. 2, б заключается в появлении противоположно вращающегося вихря малой интенсивности в правой части распределений. Этот результат подробно описан в [18].

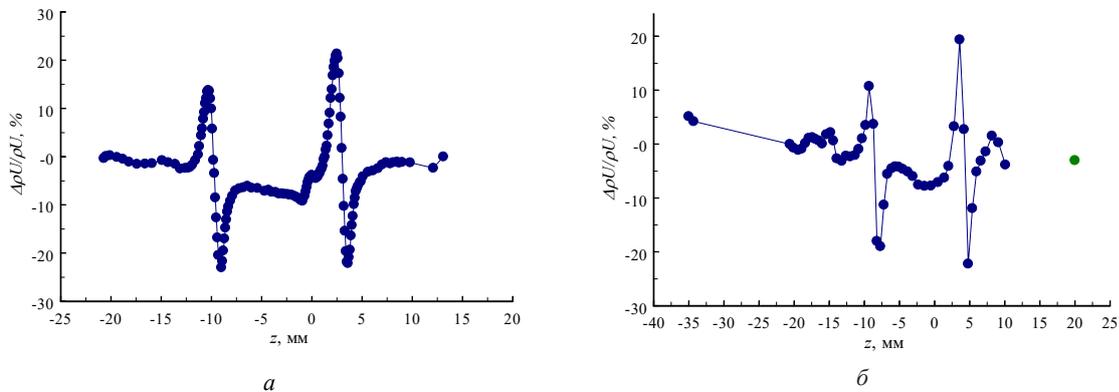


Рис. 2. Искажение среднего течения в зависимости от поперечной координаты z : данные [19] (а) и полученные экспериментальные данные (б)

Fig. 2. Mean flow distortion depending on the transverse coordinate z : data [19] (a) and experimental data obtained (b)

Целью данной работы является экспериментальная оценка числа Рейнольдса перехода в области развития пары продольных вихрей в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины в постановке, аналогичной [12] и сравнение полученных данных с неопубликованными результатами, представленными в [19]. Полученные в эксперименте и работе [19] результаты приведены на рис. 3, а, б.

На рис. 3, а представлены полученные данные измерений ламинарно-турбулентного перехода для случая однородного пограничного слоя и модулированного продольными вихрями. Измерения выполнялись в области воздействия вихря, порожденного волной 2 ($z = -10$ мм), а в однородном пограничном слое – при $z = 4,5$ мм. Из графика видно, что в случае, когда продольные вихри генерируются в пограничном слое, росту возмущений и началу переходного процесса соответствует значение $Re_x \approx 1,4 \times 10^6$, в то время как в однородном пограничном слое это значение составляет около $2,3 \times 10^6$. Завершение переходного процесса в случае модулированного пограничного слоя достигнуто не было. Таким образом, продольные вихри приводят к смещению начала ламинарно-турбулентного перехода в сторону меньших чисел Рейнольдса.

Однако, как показали данные на рис. 3, а, в экспериментах завершение переходного процесса в случае неоднородного пограничного слоя достигнуто не было. В связи с этим были проведены дополнительные эксперименты при аналогичных условиях (рис. 3, б), которые направлены на исследование влияния пары вихрей на ламинарно-турбулентный переход.

Рисунок 3, б иллюстрирует измерения в области вихря, порожденного волной 2 ($z = -8$ мм), в области вихря, порожденного волной 1 ($z = 4,2$ мм) и измерения в пограничном слое модели в стороне от вихрей ($z = 20$ мм). Показано, что рост амплитуды возмущений, порождаемых волной 1 (рис 1, а), начинается с $Re_x \approx 1,3 \times 10^6$, а рост возмущений, порождаемых волной 2 – с $Re_x \approx 1,6 \times 10^6$. Положению ламинарно-турбулентного перехода соответствуют значения чисел Рейнольдса $Re_x \approx 1,5 \times 10^6$ и $Re_x \approx 2 \times 10^6$ соответственно. В случае, когда измерения проводились в стороне от области воздействия вихрей, завершение переходного режима не достигнуто. Однако, рис. 3, а позволяет сделать вывод, что в однородном пограничном слое переход происходит при $Re_x \approx 3,1 \times 10^6$. Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что продольный вихрь, порождаемый волной 1, наиболее значительно смещает положение перехода в сторону меньших чисел Рейнольдса.

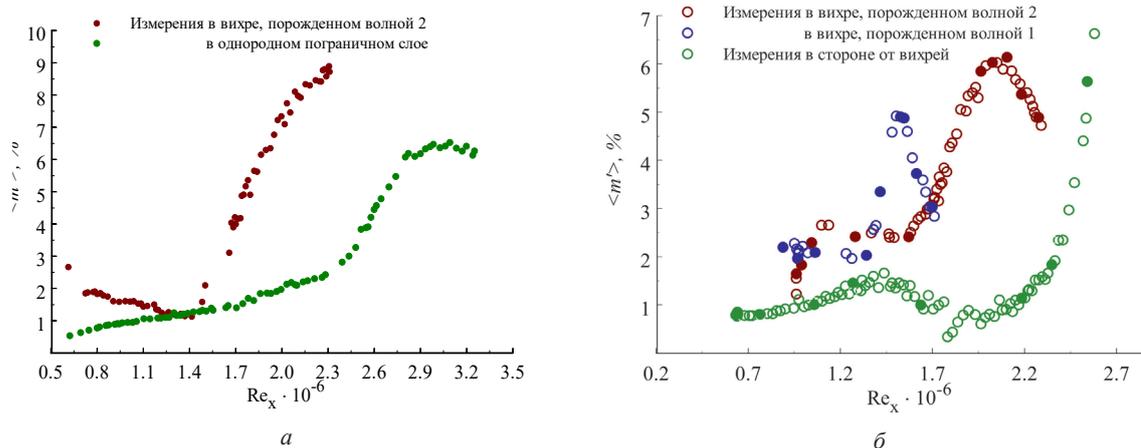


Рис. 3. Амплитуда пульсаций массового расхода в зависимости от Re_x . Результаты для сечения $x = 120$ мм: данные [19] (а) и полученные экспериментальные данные (б)

Fig. 3. Mass flow pulsations amplitude depending on Re_x . The results for $x = 120$ mm cross section: data [19] (a) and experimental data obtained (b)

Приведенные ниже спектры и плотности распределения амплитуды возмущений получены с использованием данных эксперимента, аналогичного [19].

Спектры мощности пульсаций массового расхода, представленные на рис. 4, а, показывают, что пульсации в высокочастотной области спектра не нарастают. Как следует из рис. 4, б и в, высокочастотная часть спектра нарастает, начиная с $Re_x \approx 1,5 \times 10^6$ и $Re_x \approx 2 \times 10^6$ для случаев, когда измерения выполнялись в области вихрей, порожденных волнами 1 и 2 соответственно.

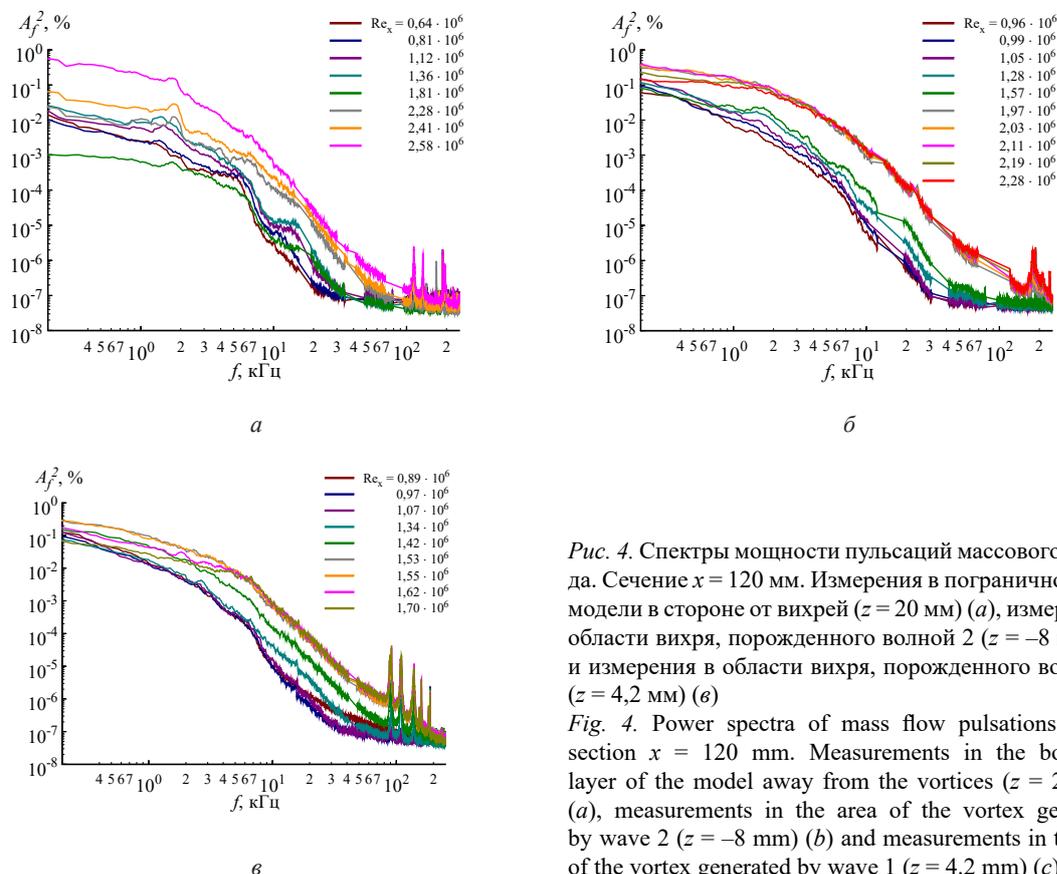


Рис. 4. Спектры мощности пульсаций массового расхода. Сечение $x = 120$ мм. Измерения в пограничном слое модели в стороне от вихрей ($z = 20$ мм) (а), измерения в области вихря, порожденного волной 2 ($z = -8$ мм) (б) и измерения в области вихря, порожденного волной 1 ($z = 4,2$ мм) (в)

Fig. 4. Power spectra of mass flow pulsations. Cross section $x = 120$ mm. Measurements in the boundary layer of the model away from the vortices ($z = 20$ mm) (a), measurements in the area of the vortex generated by wave 2 ($z = -8$ mm) (b) and measurements in the area of the vortex generated by wave 1 ($z = 4.2$ mm) (c)

Широко используемой характеристикой при анализе данных является плотность распределения амплитуды возмущений [20]. Известно, что ламинарно-турбулентный переход в пограничном слое наступает вследствие возбуждения возмущений, их линейного, нелинейного роста и взаимодействия. Существует несколько способов, которые позволяют судить о наличии нелинейных эффектов.

В данной работе измерялись естественные возмущения и поэтому используется статистический подход. Его суть состоит в том, что рассматриваются плотности распределения цифровых осциллограмм пульсаций массового расхода. Их гауссовость соотносится с линейностью процесса развития возмущений, а наличие видимых отклонений от нормального распределения может свидетельствовать о нелинейном взаимодействии [20]. Из рис. 5, а–в следует, что, за редким исключением, в представленных в данной работе экспериментах, наблюдаемые осциллограммы (в большей или меньшей мере) отражают нелинейность возмущений в процессе ламинарно-турбулентного перехода. Плотности распределений амплитуды пульсаций (нормированные на величину стандартного отклонения $\sigma = \langle m' \rangle = \sqrt{\sum_1^N \frac{(m' - \bar{m})^2}{N-1}}$) для случая, когда измерения были выполнены в стороне от вихрей (рис. 5, а) показывают, что происходящие процессы носят нелинейный характер на всем протяжении ламинарно-турбулентного перехода. Отметим, что завершения переходного режима в пограничном слое в этих измерениях не получено (рис. 3, а).

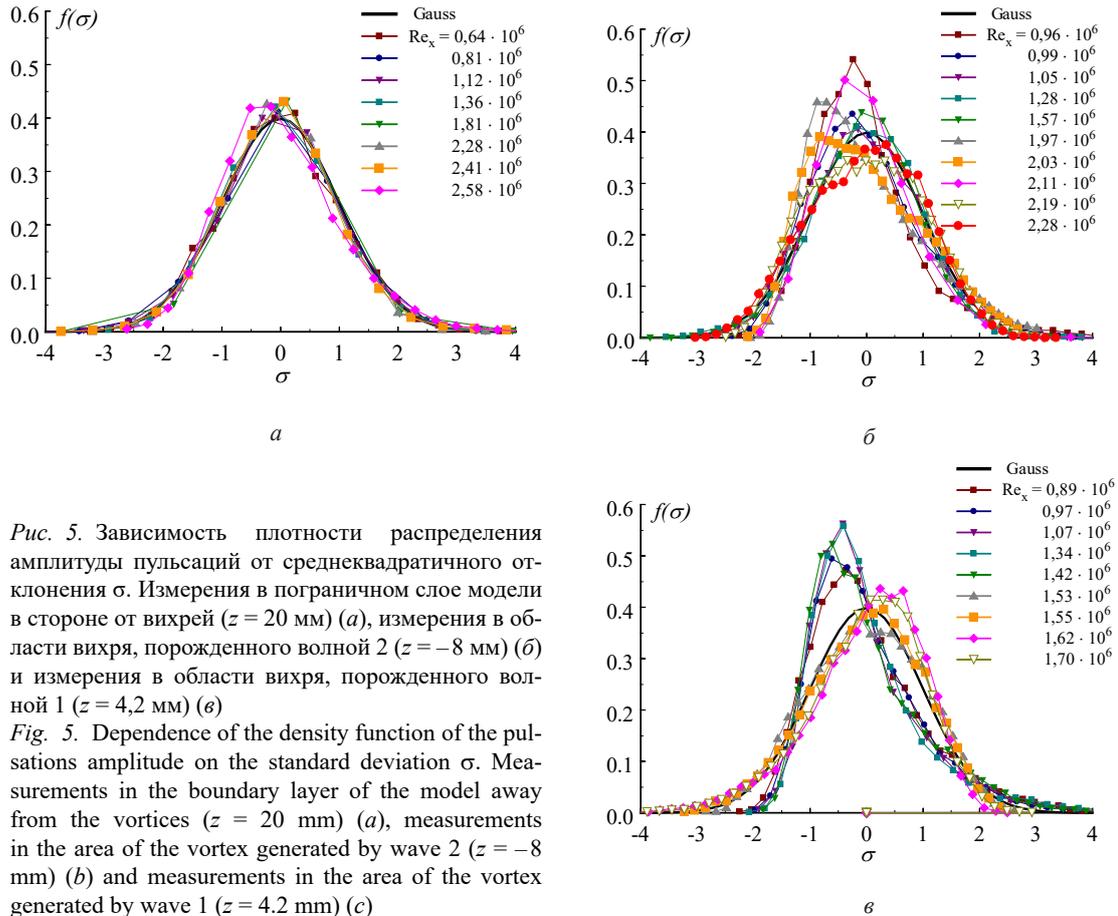


Рис. 5. Зависимость плотности распределения амплитуды пульсаций от среднеквадратичного отклонения σ . Измерения в пограничном слое модели в стороне от вихрей ($z = 20$ мм) (а), измерения в области вихря, порожденного волной 2 ($z = -8$ мм) (б) и измерения в области вихря, порожденного волной 1 ($z = 4,2$ мм) (в)

Fig. 5. Dependence of the density function of the pulsations amplitude on the standard deviation σ . Measurements in the boundary layer of the model away from the vortices ($z = 20$ mm) (a), measurements in the area of the vortex generated by wave 2 ($z = -8$ mm) (b) and measurements in the area of the vortex generated by wave 1 ($z = 4.2$ mm) (c)

На рис. 5, б и в наблюдаются более существенные отклонения в плотностях распределений амплитуды пульсаций от нормального распределения. Эти результаты получены при измерениях в области продольных вихрей и также свидетельствуют о наличии нелинейных процессов взаимодействия возмущений в пограничном слое, хотя в этих экспериментах завершение переходного режима в пограничном слое получено в обоих случаях.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование влияния продольных вихрей, порождаемых слабыми ударными волнами, на ламинарнотурбулентный переход в пограничном слое плоской затупленной пластины при числе Маха 2. Получено, что в случае однородного пограничного слоя переход достигается при $Re_x \approx 3,1 \times 10^6$, а при измерениях в области вихрей от ударных волн 1 и 2 – при значениях $Re_x \approx 1,5 \times 10^6$ и $Re_x \approx 2 \times 10^6$, соответственно. Следовательно, продольный вихрь, порождаемый волной 1, наиболее значительно смещает положение перехода в сторону меньших чисел Рейнольдса.

Таким образом, характер порождения продольных вихрей в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины может существенно влиять на положение ламинарнотурбулентного перехода.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 121030500161-0) с использованием оборудования ЦКП «Механика» (ИТПМ СО РАН).

Список литературы

1. Гапонов С. А., Левченко В. Я. Современные проблемы перехода пограничного слоя // Успехи механики. 1981. Т. 4. Вып. 4. С. 47–90
2. Жигулев В. Н., Тумин А. М. Возникновение турбулентности. Новосибирск: Наука, 1987. 282 с.
3. Morkovin M. V. Panoramic view of changes in vorticity distribution in transition instabilities and turbulence // Boundary Layer Stability and Transition to Turbulence, ed. D. C. Reda, H. L. Reed, R. Kobayashi. The First ASME/JSME Fluids Engineering Conference, Portland, Oregon, 23-27 June, 1991. P. 1–12
4. Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В. Возникновение турбулентности в пристенных течениях. Новосибирск: Наука, 1999. 327 с.
5. Matsubara M. and Alfredsson P. H. Disturbance growth in boundary layers subjected to free stream turbulence, J. Fluid Mech. 430, 149, 2001.
6. Fransson J. H. M., Brandt L., Talamelli A. and Cossu C. Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer // Physics of Fluids 16, 3627, 2004.
7. Грек Г. Р., Катаонов М. М., Козлов В. В. Моделирование полосчатых структур и возникновения турбулентного пятна в пограничном слое крыла при повышенной степени турбулентности набегающего потока // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 585–598.
8. Boiko A. V., Westin K. J. A., Klingmann B. G. B., Kozlov V. V., and Alfredsson P. H. Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. Part 2. The role of TS-waves in the transition process, J. Fluid Mech. 281, 219, 1994.
9. Ваганов А. В., Ермолаев Ю. Г., Колосов Г. Л., Косинов А. Д., Панина А. В., Семенов Н. В., Яцких А. А. К воздействию падающей волны Маха на сверхзвуковой пограничный слой // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 1. С. 45–50.
10. Динь К. Х., Егоров И. В., Федоров А. В. Взаимодействие волн Маха и пограничного слоя при сверхзвуковом обтекании пластины с острой передней кромкой // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. 48. № 4. С. 10–19.
11. Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V. Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate // Fluid Dynamics. 2018. Vol. 53. No. 5. P. 690–701
12. Динь К. Х., Егоров И. В., Федоров А. В. Влияние волн Маха на ламинарно-турбулентный переход при сверхзвуковом обтекании плоской пластины // Изв. РАН. МЖГ. 2018. No 5. С. 113–124.
13. Kosinov A. D., Yatskikh A. A., Yermolaev Yu. G., Semionov N. V., Kolosov G. L., Piterimova M. V. On mechanisms of the action of weak shock waves on laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893. P. 030072.
14. Kosinov A. D., Yermolaev Yu. G., Nikolaev N. N., Semionov N. V., Semisynov A. I. On the measurement of the pulsation in supersonic flow by constant temperature hot – wire anemometer // 13th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR–2007): (Novosibirsk, Russia, 5–10 Febr. 2007): Proc. – Pt. 5. – Novosibirsk: Parallel, 2007. – P. 81–86.
15. Yatskikh A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Smorodsky B. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L. Investigation of laminar-turbulent transition of supersonic boundary layer by scanning constant temperature hot-wire anemometer // AIP Conference Proceedings: XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018). Vol. 2027. No.1. AIP Publishing, 2018. 040041(5) p.
16. Kosinov A. D., Yermolaev Yu. G., Semionov N. V., Kolosov G. L., Panina A. V. To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer // Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter

- (HEPCM 2017): Dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Russia, Novosibirsk, 5–9 Jun., 2017) : AIP Conference Proceedings. – Vol.1893, No.1. – S.I.: AIP Publishing, 2017. – 030073 p. DOI 10.1063/1.5007531.
17. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G.** Disturbances in test section of T-325 supersonic wind tunnel. Novosibirsk. 1999. 24 p. (Preprint Institute of Theoretical and Applied Mechanics, No 6–99).
 18. **Panina A. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G.** On introduction of controlled disturbances into a longitudinal vortex in a supersonic boundary layer // AIP Conference Proceedings: XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018) (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018). Vol.2027, No.1. AIP Publishing, 2018. 040077(4) p.
 19. **Косинов А. Д., Семенов Н. В., Яцких А. А., Ермолаев Ю. Г., Питеримова М. В.** Экспериментальное исследование взаимодействия слабых ударных волн со сверхзвуковым пограничным слоем плоской затупленной пластины при числе Маха 2 // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13. № 3. С. 16–23.
 20. **Питеримова М. В., Яцких А. А., Косинов А. Д., Семенов Н. В., Ермолаев Ю. Г.** Экспериментальное исследование воздействия слабых ударных волн на ламинарно-турбулентный переход в сверхзвуковом пограничном слое плоской пластины // Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии: тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых (Новосибирск–Шерегеш, 15–22 марта 2019 г.). Новосибирск, 2019. С. 130–131.
 21. **Семисынов А. И., Косинов А. Д.** Применение спектров высокого порядка и статистических методов для изучения нелинейной стадии перехода в сверхзвуковом пограничном слое. Новосибирск, 2002. 39 с.

References

1. **Gaponov S. A., Levchenko V. Ya.** Modern problems of boundary layer transition // Uspechi Mehaniki. 1981. Vol. 4. Issue 4. P. 47–90 (in Russ.)
2. **Zhigulev V. N., Tumin A. M.** Occurrence of turbulence. Novosibirsk: Nauka, 1987. 282 p. (in Russ.)
3. **Morkovin M.V.** Panoramic view of changes in vorticity distribution in transition instabilities and turbulence // Boundary Layer Stability and Transition to Turbulence, ed. D.C.Redd, H.L.Reed, R.Kobayashi. The First ASME/JSME Fluids Engineering Conference, Portland, Oregon, 23–27 June, 1991. P. 1–12
4. **Boiko A. V., Grek G. R., Dovgal A. V., Kozlov V. V.** The emergence of turbulence in near-wall flows. Novosibirsk: Nauka, 1999. 327 p. (in Russ.)
5. **Matsubara M. and Alfredsson P. H.** Disturbance growth in boundary layers subjected to free stream turbulence, J. Fluid Mech. 430, 149, 2001.
6. **Fransson J. H. M., Brandt L., Talamelli A. and Cossu C.** Experimental and theoretical investigation of the nonmodal growth of steady streaks in a flat plate boundary layer // Physics of Fluids 16, 3627, 2004.
7. **Grek G. R., Katasonov M. M., Kozlov V. V.** Modelling of streaky structures and turbulent-spot generation process in wing boundary layer at high free-stream turbulence // Thermophysics and Aeromechanics. 2008. Vol. 15. № 4. P. 549–561.
8. **Boiko A. V., Westin K. J. A., Klingmann B. G. B., Kozlov V. V., and Alfredsson P. H.** Experiments in a boundary layer subjected to free stream turbulence. Part 2. The role of TS-waves in the transition process, J. Fluid Mech. 281, 219, 1994.
9. **Vaganov A. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L., Kosinov A. D., Panina A. V., Semionov N. V., Yatskikh A. A.** Impact of incident Mach wave on supersonic boundary layer // Thermophysics and Aeromechanics. 2016. Vol. 23, No.1. P. 43–48.

10. **Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V.** Interaction of Mach waves and boundary layer at a supersonic flow over a plate with a sharp leading edge // *TsAGI Science Journal*, 2017. Vol. 48, № 4. P. 317–329.
11. **Din Q. H., Egorov I. V., Fedorov A. V.** Mach wave effect on laminar-turbulent transition in supersonic flow over a flat plate // *Fluid Dynamics*. 2018. Vol. 53. No. 5. P. 690–701.
12. **Kosinov A. D., Yatskikh A. A., Yermolaev Yu. G., Semionov N. V., Kolosov G. L., Piterimova M. V.** On mechanisms of the action of weak shock waves on laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer // *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1893. P. 030072.
13. **Kosinov A. D., Yermolaev Yu. G., Nikolaev N. N., Semionov N. V., Semisynov A. I.** On the measurement of the pulsation in supersonic flow by constant temperature hot – wire anemometer // 13th International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR–2007): (Novosibirsk, Russia, 5–10 Febr. 2007): Proc. Pt.5. Novosibirsk: Parallel, 2007. P. 81–86.
14. **Yatskikh A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Smorodsky B. V., Ermolaev Yu. G., Kolosov G. L.** Investigation of laminar-turbulent transition of supersonic boundary layer by scanning constant temperature hot-wire anemometer // *AIP Conference Proceedings: XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018)* (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018). Vol. 2027. No.1. AIP Publishing, 2018. 040041(5) p.
15. **Kosinov A. D., Yermolaev Yu. G., Semionov N. V., Kolosov G. L., Panina A. V.** To the analysis of the natural pulsation development during laminar-turbulent transition in supersonic boundary layer // *Proceedings of the XXV Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM 2017): Dedicated to the 60th anniversary of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS* (Russia, Novosibirsk, 5–9 Jun., 2017) : AIP Conference Proceedings. Vol.1893, No.1. S.l.: AIP Publishing, 2017. 030073 p. DOI 10.1063/1.5007531.
16. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G.** Disturbances in test section of T-325 supersonic wind tunnel. Novosibirsk. 1999. 24 p. (Preprint Institute of Theoretical and Applied Mechanics, No 6–99).
17. **Panina A. V., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G.** On introduction of controlled disturbances into a longitudinal vortex in a supersonic boundary layer // *AIP Conference Proceedings: XIX International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2018)* (Novosibirsk, Russia, 13–19 Aug., 2018). Vol.2027, No.1. AIP Publishing, 2018. 040077(4) p.
18. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Yatskikh A. A., Yermolaev Yu. G., Piterimova M. V.** Experimental study of effect of weak shock waves on supersonic boundary layer of flat plate with blunt leading edge at Mach number 2. *Siberian Journal of Physics*. 2018. 13 (3):16–23. (In Russ.)
19. **Piterimova M. V., Yatskikh A. A., Kosinov A. D., Semionov N. V., Yermolaev Yu. G.** Experimental study of the impact of weak shock waves on the laminar-turbulent transition in the supersonic boundary layer of a flat plate // *Problems of mechanics: theory, experiment and new technologies: abstracts of the XIII All-Russian Conference of Young Scientists* (Novosibirsk-Sheregesh, March 15–22, 2019). Novosibirsk, 2019, pp. 130–131. (In Russ.)
20. **Semisynov A. I., Kosinov A. D.** Application of high-order spectra and statistical methods for studying the nonlinear transition stage in a supersonic boundary layer. Novosibirsk, 2002. 39 p.

Сведения об авторах

Питеримова Марина Владимировна, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Семёнов Николай Васильевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Яцких Алексей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Кочарин Василий Леонидович, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Ермолаев Юрий Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Marina V. Piterimova, junior researcher, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexander D. Kosinov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Head of laboratory, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Nikolay V. Semionov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Officer, Leading researcher, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Aleksey A. Yatskikh, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, junior researcher, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Vasily L. Kocharin, junior researcher, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Yuri G. Yermolaev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Research Officer, S. A. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию 14.02.2022;

одобрена после рецензирования 31.03.2022; принята к публикации 22.06.2022

The article was submitted 14.02.2022;

approved after reviewing 31.03.2022; accepted for publication 22.06.2022

Влияние вдува газа с большой удельной теплоемкостью на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к контролируемым возмущениям

**Владимир Иванович Лысенко¹,
Борис Владимирович Смородский²,
Александр Дмитриевич Косинов³**

¹⁻³Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

¹vl@itam.nsc.ru

²smorodsk@itam.nsc.ru

³kosinov@itam.nsc.ru

Аннотация

Проведено исследование влияния распределенного вдува газа с большой теплоемкостью в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость к искусственным возмущениям. Показано, что вдув газа с большой теплоемкостью C_p при некоторых значениях расхода может приводить к стабилизации сверхзвукового пограничного слоя.

Ключевые слова

сверхзвуковой пограничный слой, гидродинамическая устойчивость, контролируемые возмущения, теплоемкость

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ гос. регистрации 121030500161-0).

Для цитирования

Лысенко В. И., Смородский Б. В., Косинов А. Д. Влияние вдува газа с большой удельной теплоемкостью на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя к контролируемым возмущениям // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 41–47. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-41-47

Effect of injection of gas with high specific heat capacity on supersonic boundary-layer stability to controlled disturbances

**Vladimir I. Lysenko¹,
Boris V. Smorodsky²,
Alexander D. Kosinov³**

¹⁻³Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹vl@itam.nsc.ru

²smorodsk@itam.nsc.ru

³kosinov@itam.nsc.ru

Abstract

A study of the effect of distributed gas with high specific heat capacity blowing into the supersonic boundary layer on its stability to artificial disturbances was conducted. It is shown that the injection of gas with high heat capacity C_p at certain flow values can lead to the stabilization of the supersonic boundary layer.

Keywords

supersonic boundary layer, hydrodynamic stability, controlled disturbances, specific heat

Source of funding

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No.121030500161-0).

For citation

Lysenko V. I., Smorodsky B. V., Kosinov A. D. Effect of injection of gas with high specific heat capacity on supersonic boundary-layer stability to controlled disturbances. *Siberian Journal of Physics*. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 41–47. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-41-47

Введение

В ряде задач возникает вопрос об управлении пограничным слоем. Один из методов такого управления – отсасывание газа из пограничного слоя через проницаемую поверхность, с помощью которого можно замедлить процесс турбулизации пограничного слоя (стабилизирующая роль отсасывания объясняется уменьшением толщины пограничного слоя и формированием более устойчивого профиля скорости). Вопросу стабилизации течения (как при дозвуковых, так и при сверхзвуковых скоростях) посвящены статьи [1; 2].

К сожалению, пористые покрытия являются шероховатыми по природе. Ввиду этого их влияние на переход связано как с проницаемостью (нестационарное течение газа внутри пористого покрытия), так и с воздействием шероховатости. В работах [3–6] при определении положения ламинарно-турбулентного перехода и исследовании устойчивости пограничного слоя как к естественным, так и искусственным возмущениям, получено, что пористое покрытие ускоряет переход и оказывает дестабилизирующее воздействие на первую моду возмущений.

В то же время, как показали расчеты и эксперименты [7–9] авторов данной работы, можно стабилизировать сверхзвуковой пограничный слой с помощью инжекции (вдува) тяжелого газа в пристеночный слой этого пограничного слоя, тем самым выгодно меняя (делая более устойчивым) течение за счет изменения профиля плотности поперек пограничного слоя.

Также представляет интерес исследование влияния инжекции газа с большой удельной теплоемкостью в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость, однако подобные исследования (по крайней мере, экспериментальные) ранее не проводились.

Цель данной работы – экспериментальное исследование влияния распределенного вдува гелия в сверхзвуковой ($M = 2$) пограничный слой на его устойчивость.

1. Постановка эксперимента

Эксперименты проводились в аэродинамической трубе Т-325 ИТПМ СО РАН [10] при числе Маха набегающего потока $M_\infty = 2$, температуре торможения потока $T_0 \approx 290$ К и значении единичного числа Рейнольдса $Re_{1\infty} = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

Экспериментальная модель располагалась в рабочей части установки в потоке воздуха, а в качестве инжектируемого в пограничный слой газа использовался гелий – газ с большой удельной теплоемкостью $C_p = 5296$ Дж/(кг К) (т.е. в 5,3 раза большей, чем у воздуха), плотностью $\rho = 0,178$ кг/м³ и температурой кипения $t_{\text{кип}}^\circ = -269$ °С. Эксперименты проводились при вдуве гелия в пристенную область пограничного слоя с разным расходом газа.

Моделью являлась теплоизолированная плоская пластина, изготовленная из нержавеющей стали Х18Н9Т, длиной 440, толщиной 10 и шириной 200 мм с носиком, скошенным под углом 14°, и радиусом притупления передней кромки около 0,05 мм (та же, что и в [6; 8]). Начало отсчета используемой в дальнейшем продольной (вдоль направления внешнего течения) координаты x находится на передней кромке модели. На участке $x = 50 \div 170$ мм рабочей поверхности (на всю ширину пластины) в модели был сформирован паз, куда вставлялась заподлицо с основной поверхностью модели пористая вставка-пластинка с пористостью 39 %, с чистотой фильтрации (аналог размера пор) 10 мкм и толщиной 2,5 мм (с шероховатостью по-

верхности $R_z \approx 11\text{--}12$ мкм). Эта вставка выполнена из пористой нержавеющей стали ПНС-8, производимой Выксунским металлургическим заводом (спеченной из порошка, размер зерен около 70 мкм). В силу конструкции модели, проникаемая часть пористой вставки располагалась на участке $x = 65 \div 155$ мм и $z = \pm 85$ мм (от оси модели). Пластина жестко крепилась к боковым стенкам рабочей части трубы и устанавливалась под нулевым углом атаки.

Измерения устойчивости пограничного слоя к искусственным возмущениям выполнялись с помощью термоанемометра постоянного сопротивления с одноточечным датчиком из вольфрамовой нити диаметром 10 мкм и длиной 1,5 мм. Величина перегрева нити датчика составляла 0,8, вследствие этого можно утверждать, что фиксировались преимущественно пульсации массового расхода.

Искусственные (контролируемые) возмущения вводились в пограничный слой модели с помощью точечного источника на основе высокочастотного тлеющего разряда [11]. Исследования искусственных возмущений в пограничном слое модели проводились вблизи максимума пульсаций при $E = \text{const}$ (E – среднее напряжение в диагонали моста термоанемометра), что соответствовало линии равного массового расхода.

Пульсационные и средние характеристики потока измерялись с помощью автоматизированной системы сбора данных, которой оборудована аэродинамическая труба Т-325. Пульсационное напряжение с термоанемометра записывалось в персональный компьютер с помощью двенадцатиразрядного амплитудно-цифрового преобразователя с частотой отсчетов 750 кГц. Длина реализаций составляла 65536 точек. В каждой точке для контроля повторяемости результатов выполнялось по четыре измерения. Среднее напряжение термоанемометра фиксировалось вольтметром Agilent 34401А и записывалось в компьютер через последовательный порт. Показания средних и пульсационных характеристик поля потока снимались в основном через каждые 2 мм по продольной координате x . Амплитудно-частотный спектр $A(f, x)$ рассчитывался как результат осреднения спектров мощности.

2. Результаты

Воздух и гелий сильно отличаются двумя параметрами – гелий существенно легче воздуха (молекулярный вес меньше), но у гелия в 5,3 раза больше удельная теплоемкость. И на результаты исследования воздействия вдува гелия (по сравнению с воздухом) на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя влияют одновременно два противоположно действующих фактора – происходит дестабилизация пограничного слоя за счет уменьшения плотности (меньшего молекулярного веса) газа [7–9] и одновременно стабилизация за счет роста удельной теплоемкости (см. рис. 1, здесь приведены результаты расчетов (на основе уравнений Навье-Стокса и прямого численного моделирования) авторов работы [12] для гелия; видно значительное падение температуры возле стенки, что должно привести к существенной стабилизации пограничного слоя [13]). Поэтому заранее (до эксперимента) не было известно, что будет в итоге – дестабилизация или стабилизация (причем в каком-то диапазоне расхода вдува гелия).

Ниже приводятся результаты проведенных экспериментов для контролируемых возмущений (с частотой возбуждения 14 кГц) при $M_\infty = 2$ и $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$.

На рис. 2 показаны β -спектры, измеренные на частоте возбуждения $f = 14$ кГц в экспериментах на модели для гладкой вставки (a) и для проникаемой вставки с различным расходом вдува He $Q = 0; 0.25; 5,5$ литр/мин (b – $г$) при $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$. Нормализованные (на величину максимума на первом по x участке) амплитуды среднеквадратичных флуктуаций A_β при разных значениях продольной координаты приведены в зависимости от размерного трансверсального волнового числа β рад/мм.

Рисунок 2 демонстрирует, что вдув гелия стабилизирует возмущения на частоте возбуждения $f = 14$ кГц.

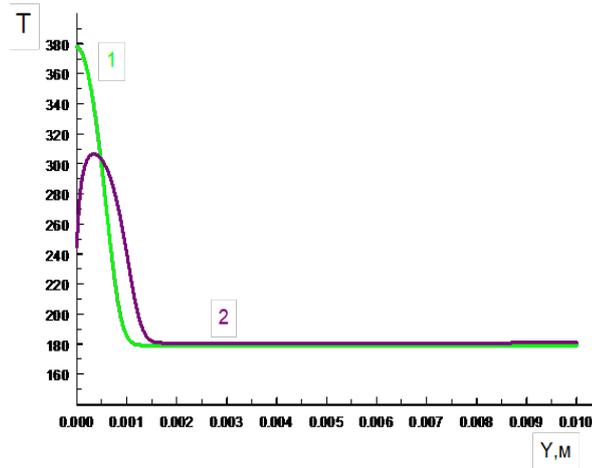


Рис. 1. Профили температуры в сверхзвуковом пограничном слое: без вдува (1) и со вдувом гелия (2); $M = 2.5$, концентрация гелия 12% на поверхности пластины, $P_0 = 3000$ Па, $Re_{1\infty} = 5,5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $x = 60$ мм. Результаты расчетов предоставлены авторами работы [12]

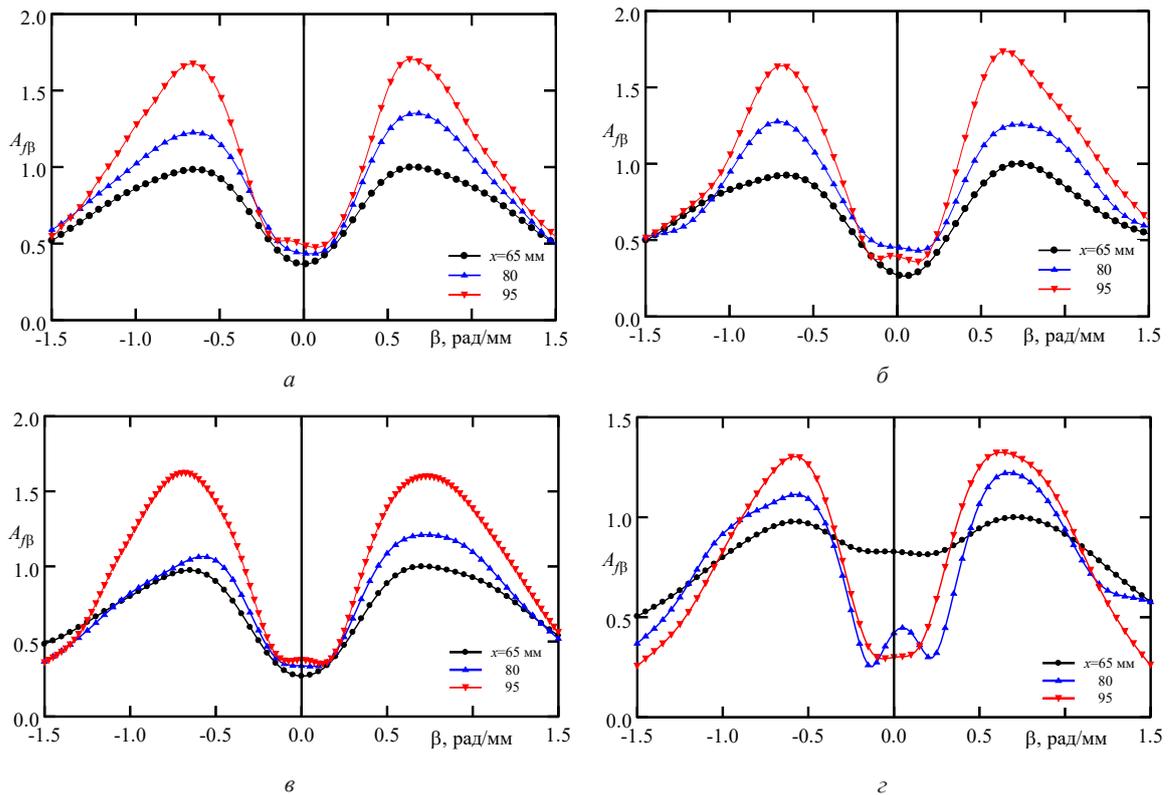


Рис. 2. Измеренные спектры возмущений: нормированная среднеквадратичная амплитуда возмущений A_{β} в зависимости от трансверсального волнового числа β в диапазоне значений продольной координаты $65 \leq x \leq 95$ мм для: (а) сплошной вставки; (б–г) проницаемой вставки; (б) без инжекции газа (расход инжектируемого газа $Q = 0$); (в) при инжекции газа с расходом $Q = 0,25$ л/мин; (г) с расходом вдуваемого газа $Q = 5,5$ л/мин; $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $f = 14$ кГц.

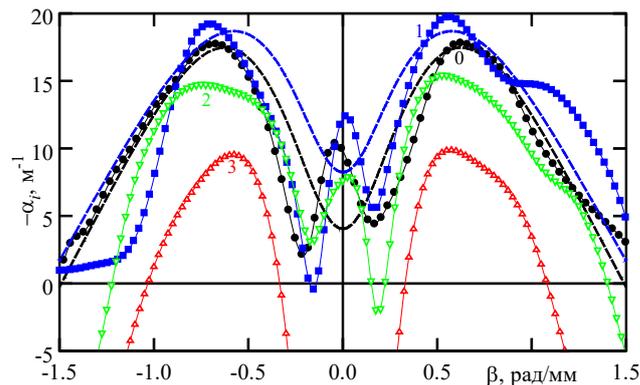


Рис. 3. Скорости пространственного усиления возмущений $-\alpha_i$ в зависимости от трансверсального волнового числа β для: (0) сплошной вставки; (1–3) проницаемой вставки; (1) без инжекции газа (расход инжектируемого газа $Q = 0$); (2) при инжекции газа с расходом $Q = 0,25$ л/мин; (3) с расходом вдуваемого газа $Q = 5,5$ л/мин; $Re_1 = 5 \times 10^6 \text{ м}^{-1}$, $x = 85$ мм, $f = 14$ кГц.

На рис. 3 показаны локальные скорости пространственного усиления $-\alpha_i = -\alpha_i(\beta)$ для проницаемой вставки при $x = 85$ мм. Экспериментальные скорости роста были определены с помощью полиномиальной регрессии измеренных данных для кривых роста $\ln A(x)$ возмущений с различными β . Затем определялись степени нарастания возмущений по формуле $-\alpha_i = \partial \ln A(x) / \partial x$. Размерные значения скорости усиления показаны на рис. 3 в зависимости от трансверсального волнового числа.

Рис. 3 демонстрирует стабилизацию возмущений на частоте возбуждения $f = 14$ кГц при инжекции гелия в некотором диапазоне значений его расхода.

Таким образом, несмотря на дестабилизирующее [7–9] влияние малой (по сравнению с воздухом) плотности, вдув газа со значительно большей (чем у воздуха) удельной теплоемкостью C_p при некоторых значениях расхода этого газа может вести к стабилизации сверхзвукового пограничного слоя.

3. Выводы

Проведено исследование влияния распределенного вдува газа с большой теплоемкостью (гелия) в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость к контролируемым возмущениям.

Показано, что вдув газа с большой теплоемкостью C_p при некоторых значениях расхода этого газа может приводить к стабилизации сверхзвукового пограничного слоя.

Список литературы / References

1. **Бойко А. В., Грек Г. Р., Довгаль А. В., Козлов В. В.** Физические механизмы перехода к турбулентности в открытых течениях. М – Ижевск: НИЦ РХД, Ин-т компьют. исслед., 2006. 304 с.
2. **Гапонов С. А., Маслов А. А.** Развитие возмущений в сжимаемых потоках. Новосибирск: Наука, 1980. 144 с.
3. **Гапонов С. А., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Лысенко В. И., Семенов Н. В., Смородский Б. В.** Теоретическое и экспериментальное исследование развития первой моды неустойчивости в сверхзвуковых пограничных слоях на пористых поверхностях // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2014. Т. 9, выпуск 2. С. 65–74.

4. **Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Лысенко В. И., Семенов Н. В., Смородский Б. В.** Совместное влияние проницаемости и шероховатости поверхности на устойчивость и переход сверхзвукового пограничного слоя на плоской пластине // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2014. № 5. С. 52–59.
5. **Лысенко В. И., Гапонов С. А., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д., Семенов Н. В.** О влиянии толщины пористого покрытия на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2015. Т. 10, выпуск 3. С. 41–47.
6. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A. D., Semionov N. V.** Combined Influence of Coating Permeability and Roughness on Supersonic Boundary Layer Stability and Transition // *J. Fluid Mech*, 2016, vol. 798, p. 751–773.
7. **Лысенко В. И., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д.** Экспериментальное исследование влияния инъекции тяжелого газа в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 2. С. 191–198.
8. **Lysenko V. I., Gaponov S. A., Smorodsky B. V., Yermolaev Yu. G., Kosinov A. D.** Influence of Distributed Heavy-Gas Injection on Stability and Transition of Supersonic Boundary-Layer Flow // *Physics of Fluids*, 2019, vol. 31, p.104103. DOI 10.1063/1.5112145.
9. **Лысенко В. И., Гапонов С. А., Зубков Н. Н., Смородский Б. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д.** Влияние распределенного тангенциального вдува тяжелого газа в сверхзвуковой пограничный слой на его устойчивость // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 1. С. 25–32.
10. **Багаев Г. И., Лебига В. А., Приданов В. Г., Черных В. В.** Сверхзвуковая аэродинамическая труба Т-325 с пониженной степенью турбулентности // Аэрофизические исследования. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР, 1972. С. 11–13.
11. **Kosinov A. D., Semionov N. V., Shevelkov S. G.** Investigation of supersonic boundary layer stability and transition using controlled disturbances. In: Proc. Intern. Conf. Meth. Aerophys. Research, ITAM, USSR Acad. Sci., Siberian Branch, Novosibirsk, 1994, pt. 2, p. 159–166.
12. **Гапонов С. А., Семенов А. Н.** Влияние направления вдува газа через пористую поверхность на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2015. Т. 10, выпуск 2. С. 18–26.
13. **Lysenko V. I., Maslov A. A.** The effect of cooling on the supersonic boundary layer stability // *J. Fluid Mech*, 1984, vol. 147, p. 39–52.

Сведения об авторах

Лысенко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (Новосибирск, Россия)

Смородский Борис Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (Новосибирск, Россия)

Косинов Александр Дмитриевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Vladimir I. Lysenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Boris V. Smorodsky, Candidate of Science (Physics and Mathematics), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexander D. Kosinov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), head of laboratory of Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 25.01.2022;
одобрена после рецензирования 25.03.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 25.01.2022;
approved after reviewing 25.03.2022; accepted for publication 22.06.2022*

Научная статья
УДК 662.2; 534.222.2
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-48-55

Двухстадийная модель конденсации углерода при детонации конденсированных взрывчатых веществ

Иван Андреевич Рубцов

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирск, Россия
rubtsov@hydro.nsc.ru

Аннотация

При детонации взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом, одним из продуктов химической реакции является конденсированный углерод. Однако недостаток экспериментальных данных не позволяет на сегодняшний день дать количественную оценку процесса конденсации углерода. В данной работе предложена двухстадийная модель конденсации углерода при детонации взрывчатых веществ. В работе использовалась методика малоуглового рентгеновского рассеяния для изучения динамики формирования углеродных наночастиц при детонации зарядов смеси тротила с гексогеном.

Ключевые слова

взрывчатые вещества, детонация, конденсация углерода, малоугловое рентгеновское рассеяние, синхротронное излучение

Для цитирования

Рубцов И. А. Двухстадийная модель конденсации углерода при детонации конденсированных взрывчатых веществ // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 48–55. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-48-55

Two-stage carbon condensation model during detonation of high explosives

Ivan A. Rubtsov

Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation
rubtsov@hydro.nsc.ru

Abstract

During detonating of high explosives with a negative oxygen balance, one of the products of the chemical reaction is condensed carbon. However, the lack of experimental data does not allow us to give a quantitative assessment of the carbon condensation process today. In this paper, a two-stage model of carbon condensation during the detonation of high explosives is proposed. We used small-angle X-ray scattering method to study the dynamics of the formation of carbon nanoparticles during the detonation of charges of a mixture of TNT and RDX.

Keywords

high explosives, detonation, carbon condensation, small-angle X-ray scattering, synchrotron radiation

For citation

Rubtsov I. A. Two-stage carbon condensation model during detonation of high explosives. Siberian Journal of Physics. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 48–55. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-48-55

© Рубцов И. А., 2022

Введение

Большой интерес к работам по изучению процесса конденсации углерода возник в начале 2000-х годов при изучении взрывчатых составов на основе ТАТБ. Тогда авторы [1; 2] показали, что предположение о выделении части энергии за зоной химической реакции позволяет лучше описать экспериментальные данные. Определение количества длительно выделяющейся энергии необходимо для совершенствования теоретических моделей детонации и требует экспериментальных данных по кинетике конденсации углерода за детонационным фронтом.

На сегодняшний день существует множество работ, посвященные исследованиям детонационного углерода, но большая их часть затрагивает изучение сохраненного углеродного остатка различными методиками [3–8], а для исследования процесса конденсации углерода на ранних стадиях требуются методики *in situ*. Такой методикой является малоугловое рентгеновское рассеяние синхротронного излучения (СИ), и она позволяет проследить динамику процесса конденсации углерода в детонационном процессе [9–16].

Сегодня методика малоуглового рентгеновского рассеяния с высоким временным разрешением (МУРР) для исследования взрывных процессов активно развивается. Аналогичная станция построена и введена в эксплуатацию в США на ускорительном комплексе Advanced Photon Source (APS) [9–13].

В работах [9; 10] удалось проследить эволюцию сигнала МУРР при детонации заряда гексанитростильбена (ГНС) диаметром около 6 мм со скважностью около 50 нс вблизи детонационного фронта. Все процессы, приводящие к изменению формы сигнала МУРР, завершаются за 300 нс [10]. В работе [11] получена динамика роста углеродных наночастиц при детонации смеси тротила с гексогеном диаметром 10 мм. В работе [10], кроме этого, представлена попытка определения фазового состава конденсированного углерода, используя степенной закон. Отмечено, что он разный у ГНС и смеси тротила с гексогеном [10; 13].

Современные работы американских исследований включают термохимическое моделирование, а также комплексное исследование сохраненных продуктов для более качественной интерпретации сигнала МУРР и определения фазового состояния конденсированного углерода [12; 13].

Остается дискуссионным вопрос о влиянии размера заряда на процесс конденсации углерода [16; 17]. В данной работе исследовались заряды взрывчатого вещества диаметром от 20 до 40 мм, что позволило дать качественную оценку влияния размера заряда на процесс конденсации углерода. Кроме этого, стоит отметить, что все заряды, исследуемые на APS, имеют массу до 2 г и диаметр до 10 мм, что довольно близко к критическому диаметру, где процессы нестабильны и могут происходить по-другому, чем в случае стационарной детонации на крупных зарядах.

Одной из проблем количественного описания конденсированного углерода в продуктах детонации взрывчатых веществ является его сложная структура. Формируются частицы разного размера, объединяющиеся в конгломераты. Одним из возможных способов описания является двухуровневая структура конденсированного углерода в сохраненных продуктах взрыва, которая состоит из частиц и кластеров, формируемых этими частицами [12–13; 18–21].

1. Постановка экспериментов

Эксперименты по измерению МУРР были выполнены на станции «Экстремальное состояние вещества» 8 канала ускорительного комплекса ВЭПП-4М (ИЯФ СО РАН). Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Пучок СИ формируется коллиматором Кратки (ножи K_1 и K_2), который установлен перед взрывной камерой. Прямой пучок перед детектором отсекается ножом K_3 , а рассеянные лучи регистрируются детектором DIMEX [22] с угловым разрешением 3×10^{-5} радиан. Рас-

стояние от центра заряда до детектора составляет 3432 мм, при этом стрипы детектора имеют размер 0.1 мм, таким образом, один канал детектора в этих экспериментах соответствует углу рассеяния $2\Theta = 0.02914$ мрад (см. рис. 1).

В экспериментах использовался двухбанчевый режим работы ускорительного комплекса с током около 10 мА, энергией 4.5 ГэВ, периодичностью 611 нс (продолжительность импульса СИ составляла 73 пс) [23]. Для получения СИ от ускорительного кольца использовался 9-полюсный вигглер с полем в магнитах 1.9 Тл, реальный спектр [15; 16; 24]. В работах [15; 16; 24] также описана возможность использования такого «розового» излучения для восстановления информации, полученной методом малоуглового рентгеновского рассеяния.

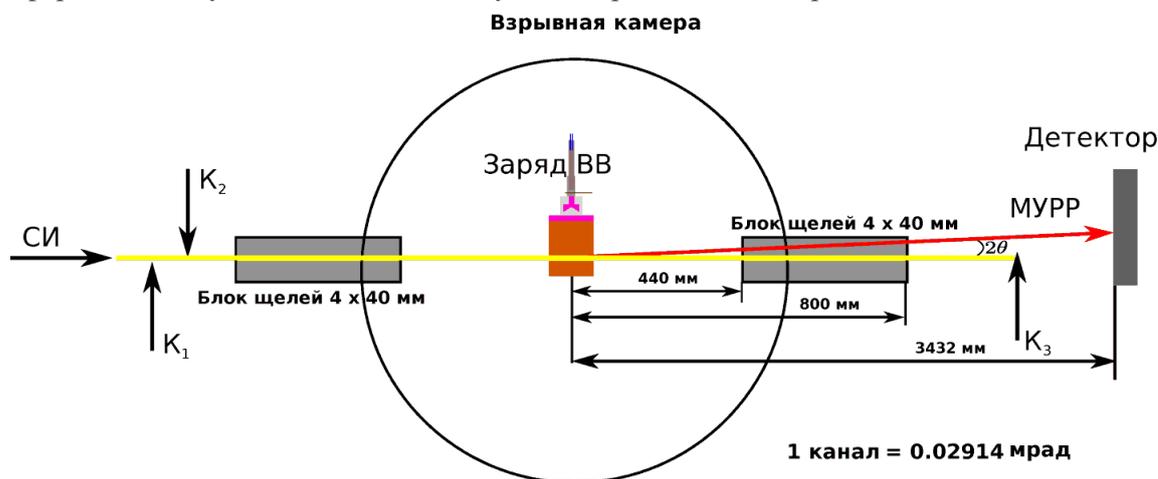


Рис. 1. Общая схема экспериментов по измерению МУРР на станции ускорительного комплекса ВЭПП-4

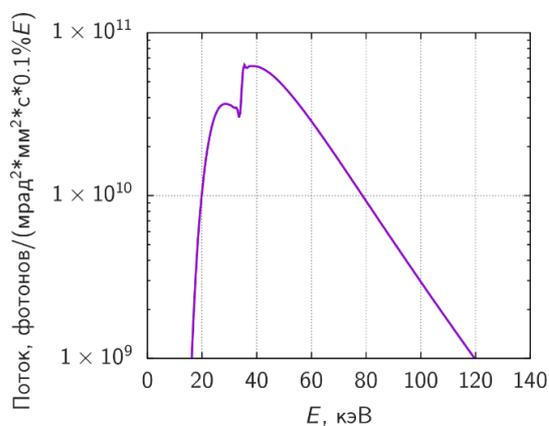


Рис. 2. Реальный спектр излучения на станции, учитывающий характеристики детектора и заряд до взрыва

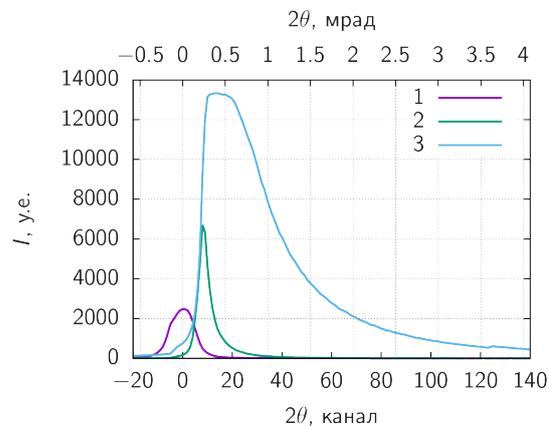


Рис. 3. 1 – ослабленный прямой пучок, 2 – сигнал после закрытия прямого пучка ножом, 3 – рассеяние на УДА

Перед началом экспериментов производилась настройка канала, регистрировались: ослабленный прямой пучок, рассеяние на воздухе, рассеяние на ультрадисперсных алмазах детонационного синтеза (УДА) (рис. 3). Сначала пучок СИ с вертикальным размером 1 мм формировался коллиматором Кратки (линия 1). Затем пучок зарезался ножом K_3 (линия 2). Амплитуда этого сигнала соответствует рассеянию на воздухе и берется за нулевой сигнал. Далее проводились статические измерения МУРР от УДА. Данные эксперименты важны для проверки готовности оборудования для экспериментов. Ожидается, что эволюция сигнала при детона-

ции будет происходить до рассеяния такого же вида, как и для калибровочной кривой МУРР на сохраненных продуктах взрыва (линия 3).

В данных экспериментах станция была настроена так, что ее оборудование позволяет уверенно регистрировать наночастицы в диапазоне углов от 0.2 до 4 мрад, что соответствует размерам частиц 2-100 нм (рис. 3) [15–16; 24–26]. Регистрирующий детектор DIMEX записывает 100 кадров с экспозицией в 73 пс и периодичностью (временем между кадрами) 611 нс [22] (дифракционное кино). Несколько кадров экспериментального сигнала, полученного с детектора, показывающие динамику сигнала МУРР представлены на рис. 4.

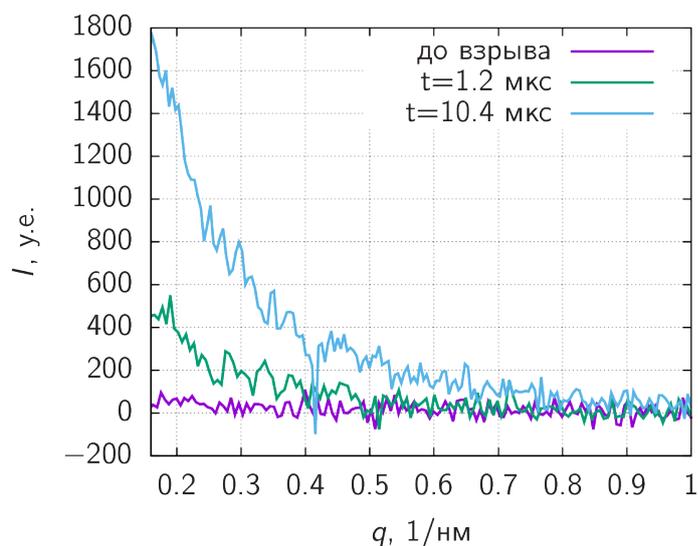


Рис. 4. Угловое распределение МУРР при детонации заряда тротил-гексоген диаметром 40 мм в разные моменты времени

2. Методика обработки экспериментальных данных

Для расшифровки структуры детонационного углерода по данным рентгеновского рассеяния необходим учет двух масштабных уровней – частицы и кластеры. Для этого численно генерировались 3D-кластеры из однородных сферических частиц разного размера по модели диффузионно ограниченная коагуляция [27] (рис. 5).

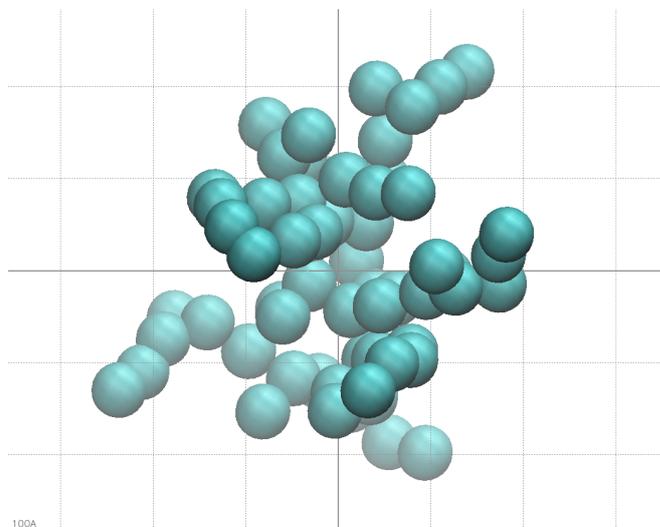


Рис. 5. Структура кластера, состоящего из 64 сферических частиц размером 5 нм

От полученного ансамбля рассеивающих центров численно вычислялось угловое распределение дифракционного сигнала [25; 26]. На рис. 6 приведено сравнение экспериментального и модельного угловых распределений рассеянного рентгеновского излучения. Удалось относительно простой моделью с двумя параметрами – размер частиц и кластеров описать рассеянное излучение в широком диапазоне углов и интенсивностей. В качестве характеристики размера кластера будем использовать удвоенный радиус гирации.

Разработанная модель нечувствительна к количеству рассеивающего углерода и определяет только размеры частиц и структуру коагуляционных кластеров. Эта важная особенность упрощает обработку экспериментальных данных.

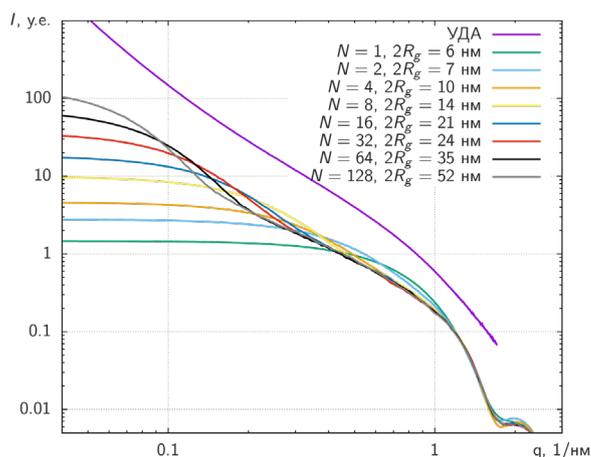


Рис. 6. Угловое распределение интенсивности рассеянного излучения от кластера, сформированного из различного количества сферических частиц со средним диаметром 5 нм

Показано сравнение со статическим сигналом МУРР от УДА, приведенное в работе [24].

3. Результаты

Описанная модель структуры конденсированного углерода в виде частиц и кластеров содержит два параметра: диаметр частиц и размер кластера. При обработке результатов динамических экспериментов, значения этих параметров подбирались из условий наилучшего соответствия модельного и экспериментального угловых распределений рентгеновского рассеяния.

В качестве результата удалось получить зависимости размеров частиц и кластеров от времени непосредственно в детонационном течении (рис. 7 и 8).

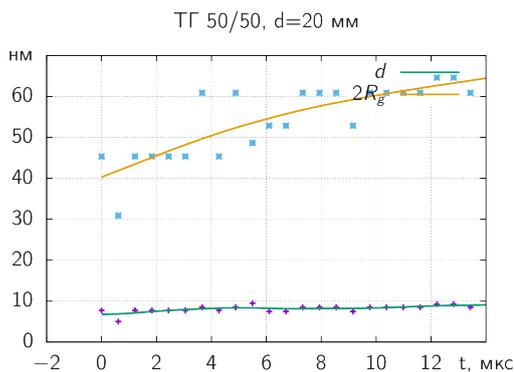


Рис. 7. Зависимости размера частиц и кластеров от времени при детонации заряда смеси тротила с гексогеном диаметром 20 мм

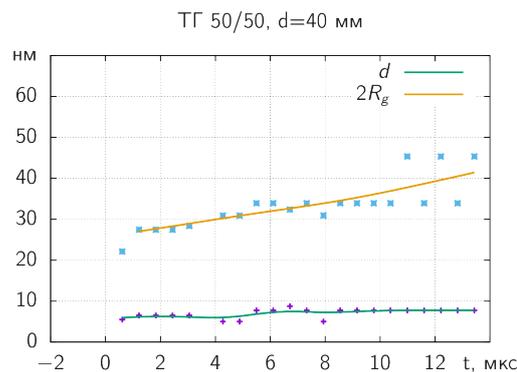


Рис. 8. Зависимости размера частиц и кластеров от времени при детонации заряда смеси тротила с гексогеном диаметром 40 мм

Анализ динамики размеров частиц и кластеров позволяет выделить два характерных времени формирования конденсированной фазы и изменения ее формы. В первой быстрой фазе, с учетом временного разрешения методики, за время не более 1 мкс, в основном, формируются частицы и начальные кластеры. Во второй фазе, на протяжении нескольких микросекунд происходит дальнейший рост кластеров, при этом, размеры частиц практически не меняются.

В проведенных экспериментах не наблюдается яркой зависимости процесса конденсации углерода от диаметра заряда ВВ.

Похожие выводы делают американские исследователи, сравнивая результаты МУРР и термохимического моделирования [12].

Заключение

Из анализа полученных экспериментальных данных предложена модель конденсации углерода, в которой можно выделить две стадии конденсации углерода. В первой, быстрой, за время менее 1 мкс формируются частицы размером 4–6 нм. Различить ее длительность на сегодняшний момент не удастся. Во второй, более медленной стадии, за несколько микросекунд из частиц углерода формируются разреженные кластеры, с характерным средним размером – десятки нанометров.

При этом, следует отметить, что для исследованных образцов смеси тротила с гексогеном не обнаружено значительной зависимости конечных размеров углеродных структур от диаметра заряда.

На примере смеси тротила с гексогеном показано, что при детонации конденсированных взрывчатых веществ с отрицательным кислородным балансом, непосредственно во взрыве формируются не только частицы конденсированного углерода, но и крупные кластеры из этих частиц. Получены оценки времени роста кластеров.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90028. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

Список литературы / References

1. **Craig M. Tarver, John W. Kury, Don R. Breithaupt** Detonation waves in triaminotrinitrobenzene. // *J. Appl. Phys.*, 1997, vol. 82, no. 8, p. 3771–3782.
2. **Grebenkin K. F., Taranik M. V., Zherebtsov A. L.** Computer modeling of scale effects at heterogeneous HE detonation // *Proc. 13th Symposium (International) on Detonation*, Norfolk, USA, 2006, p. 496–505.
3. **Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П., Сакович Г. В., Ставер А. М., Титов В. М.** Получение алмазов из взрывчатых веществ // *Доклады Академии наук*. 1988. Т. 302, № 3. С. 611–613.
4. **Greiner N. R., Philips D. S., Johnson J. D., Volk F.** Diamonds in detonation soot // *Nature*, 1988, vol. 333, p. 440–442.
5. **Волков К. В., Даниленко В. В., Елин В. И.** Синтез алмаза из углерода продуктов детонации ВВ // *Физика горения и взрыва*. 1990. Т. 26, № 3. С. 123–125.
6. **Долматов В. Ю.** Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение // *Успехи химии*. 2001. Т. 70, № 7. С. 687–708.
7. **Даниленко В. В.** Синтез и спекание алмаза взрывом. М.: Энергоатомиздат, 2003. 272 с.

8. **Казутин М. В., Козырев Н. В., Петров Е. А., Комарова М. В.** Синтез наноалмаза при детонации зарядов ТНТ/CL-20. 2016. № 4, Т. 1. С. 40–44
9. **Bagge-Hansen M., Lauderbach L., Hodgin R., Bastea S., Fried L., Jones A., van Buuren T., Hansen D., Benterou J., May C., Graber T., Jensen B. J., Ilavsky J., Willey T. M.** Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of the high explosive hexanitrostilbene // *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, iss.24, p. 245902.
10. **Willey T. M., Bagge-Hansen M., Lauderbach L., Hodgin R., Hansen D., May C., van Buuren T., Dattelbaum D. M., Gustavsen R. L., Watkins E. B., Firestone M. A., Jensen B. J., Graber T., Bastea S., Fried L.** Measurement of carbon condensates using small-angle x-ray scattering during detonation of high explosives // *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1793, iss.1, p. 030012.
11. **Firestone M. A., Dattelbaum D. M., Podlesak D. W., Gustavsen R. L., Huber R. C., Ringstrand B. S., Watkins E. B., Jensen B., Willey T., Lauderbach L., Hodgin R., Bagge-Hansen M., van Buuren T., Seifert S., Graber T.** Structural evolution of detonation carbon in composition B by X-ray scattering // *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1793, iss.1, p. 030010.
12. **Hammons J., Nielsen M., Bagge-Hansen M., Bastea S., Shaw W. L., Lee J. R. I., Ilavsky J., Sinclair N., Fezzaa K., Lauderbach L., Hodgin R., Orlikowski D., Fried L., Willey T.** Resolving Detonation Nanodiamond Size Evolution and Morphology at Sub-Microsecond Timescales during High-Explosive Detonations // *Journal of Physical Chemistry C.*, 2019, vol. 123, p. 19153–19164.
13. **Bagge-Hansen M., Bastea S., Hammons J. A., Nielsen M. H., Lauderbach L. M., Hodgin R. L., Pagoria P., May C., Aloni S., Jones A., Shaw W. L., Bukovsky E. V., Sinclair N., Gustavsen R. L., Watkins E. B., Jensen B. J., Dattelbaum D. M., Firestone M. A., Huber R. C., Ringstrand B. S., Lee J. R. I., van Buuren T., Fried L. E., Willey T. M.** Detonation synthesis of carbon nano-onions via liquid carbon condensation // *Nature Communications*, 2019, vol. 10, p. 3819.
14. **Ten K. A., Titov V. M., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Tolochko B. P., Aminov Yu. A., Lobyko B. G., Muzyrya A. K., Smirnov E. B.** Carbon condensation in detonation of high explosives // *Proceedings Fifteenth International Detonation Symposium*. San Francisco, California, USA, 2015, ONR-43-280-15, p. 369–374.
15. **Rubtsov I. A., Ten K. A., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Tolochko B. P., Shechtman L. I., Zhulanov V. V.** Synchrotron radiation method for study the dynamics of nanoparticle sizes in trinitrotoluene detonation // *Physics Procedia*, 2016, vol. 84, p. 374–381.
16. **Rubtsov I. A., Ten K. A., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Tolochko B. P., Zhulanov V. V., Shechtman L. I., Piminov P. A.** The growth of carbon nanoparticles during the detonation of trinitrotoluene // *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 754, iss.5, p. 052004.
17. **Выскубенко Б. А., Даниленко В. В., Лин Э. Э., Мазанов В. А., Серова Т. В., Сухаренко В. И., Толочко А. П.** Влияние масштабных факторов на размеры и выход алмазов при детонационном синтезе // *Физика горения и взрыва*. 1991. Т. 27, № 2. С. 111–117.
18. **Ершов А. П., Куперштох А. Л.** Образование фрактальных структур при взрыве // *Физика горения и взрыва*. 1992. Т. 28, № 2. С. 108–109.
19. **Куперштох А. Л., Ершов А. П., Медведев Д. А.** Модель коагуляции углеродных кластеров при высоких плотностях и температуре // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34, № 4. С. 102–109.
20. **Даниленко В. В.** О коагуляции углеродных кластеров в детонационной волне // *Физика горения и взрыва*. 2017. Т. 53, № 1. С. 105–114.
21. **Satonkina N. P., Ershov A. P., Kashkarov A. O., Rubtsov I. A.** Elongated conductive structures in detonation soot of high explosives // *RSC Advances*, 2020, vol. 10, iss.30, p. 17620–17626.

22. **Shekhtman L. I., Aulchenko V. M., Bondar A. E., Dolgov A. D., Kudryavtsev V. N., Nikolenko D. M., Papishev P. A., Pruel E. R., Rachek I. A., Ten K. A., Titov V. M., Tolochko B. P., Zhilich V. N., Zhulanov V. V.** Gem-based detectors for SR imaging and particle tracking // Journal of Instrumentation, 2012., iss.7, p. C03021.
23. **Blinov V. E., Bobrovnikov V. S., Zolotarev K. V., Kiselev V. A., Kononov S. A., Kurkin G. Y., Levichev E. B., Meshkov O. I., Muchnoi N. Y., Nikiti S. A., Nikoilenko D. M., Sukhanov D. P., Tikhonov Y. A., Tolochko B. P., Tumaikin G. M., Shamov A. G., Shatilov D. N.** The status of vepp // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2014, iss.4 (11), p. 620–631.
24. **Rubtsov I., Ten K., Pruel E., Kashkarov A., Zubavichus Ya., Peters G., Veligzhanin A.** Restoring size of detonation nanodiamonds from small-angle x-ray scattering of polychromatic synchrotron radiation beam // Journal of Physics: Conference Series, 2021, vol. 1787, p. 012029.
25. **Schnablegger H., Singh Y.** The SAXS Guide. Anton Paar GmbH, 2013.
26. **Feigin, L. A., Svergun, D. I.** Structure Analysis by Small-Angle X-Ray and Neutron Scattering. NY, Plenum Press, 1987.
27. **Witten T. A., Sander L. M.** Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon // Physical Review Letters, 1981, vol. 47, iss.19, p. 1400–1403.

Сведения об авторе

Рубцов Иван Андреевич, младший научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (Новосибирск, Россия)

Information about the Author

Ivan A. Rubtsov, Junior Researcher, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 30.08.2021;
одобрена после рецензирования 19.09.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 30.08.2021;
approved after reviewing 19.09.2022; accepted for publication 22.06.2022*

Научная статья

УДК 536.461

DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-56-68

Структура пламен смесей аммиак/водород/кислород/аргон при повышенных давлениях

Ксения Николаевна Осипова¹,
Андрей Геннадьевич Шмаков²

¹⁻²Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН
Новосибирск, Россия

¹k.n.osipova23@gmail.com

²shmakov@kinetics.nsc.ru

Аннотация

Актуальной задачей является поиск альтернативных источников топлива. Наиболее привлекательным из них является водород, поскольку при его горении образуется только вода. Однако ввиду специфических свойств водорода его широкое применение в качестве топлива не представляется возможным. Существует идея использования химических носителей водорода таких как, например, аммиак. Для улучшения характеристик горения аммиака в него можно добавить небольшое количество водорода, который может быть получен из самого аммиака. В работе представлены экспериментальные данные по структуре пламен смесей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ при давлении 4 атм. Значения коэффициента избытка топлива составляли 0,8, 1,0 и 1,2, соотношение NH_3/H_2 бралось равным 1/1. Для измерения структуры пламен использован метод зондовой молекулярно-пучковой масс-спектрометрии с мягкой ионизацией электронным ударом. Для стабилизации пламен использовалась плоская горелка. Температурные профили в пламени измерялись при помощи тонких термопар S-типа. Численное моделирование проводилось при помощи модуля PREMIX из программного пакета CHEMKIN. Сравнение экспериментальных и численных данных позволило выбрать химико-кинетический механизм окисления смесей NH_3/H_2 из числа представленных в литературе, обладающий наилучшей предсказательной способностью. Экспериментальные и численные данные показали, что основными азотсодержащими соединениями в зоне конечных продуктов горения являются N_2 и NO , при этом концентрация N_2O и NO_2 незначительна. Показано, что с точки зрения снижения концентрации NO в зоне конечных продуктов горения наиболее оправдано использовать горючие смеси с небольшим избытком топлива. Кроме того, было проанализировано влияние величины коэффициента избытка топлива на пиковую концентрацию NO , N_2O и NO_2 . Было показано, что для снижения пиковой концентрации NO , N_2O и NO_2 также предпочтительно использовать богатые топливные смеси.

Ключевые слова

аммиак, водород, структура пламени, масс-спектрометрия

Для цитирования

Осипова К. Н., Шмаков А. Г. Структура пламен смесей аммиак/водород/кислород/аргон при повышенных давлениях // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 56–68. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-56-68

Flame Structure of Ammonia/Hydrogen/Oxygen/Argon Mixtures at High Pressure

Ksenia N. Osipova¹, Andrey G. Shmakov²

¹⁻²Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS
Novosibirsk, Russia

¹k.n.osipova23@gmail.com

²shmakov@kinetics.nsc.ru

Abstract

The search of alternative fuels is one of the most important issues. Hydrogen is the most attractive one since its combustion products include only water. However, due to its specific properties wide implementation of hydrogen is not possible. There is an idea to use chemical carriers of hydrogen, for example, ammonia. The addition of hydrogen, which is the product of ammonia cracking, can improve the combustion characteristics of ammonia. The work presents experimental data on the structure of NH₃/H₂/O₂/Ar flames at 4 atm. Equivalence ratio values were 0.8, 1.0 and 1.2, NH₃/H₂ ratio – 1/1. Flame structure was measured with molecular beam mass spectrometry with soft electron impact ionization. In the experiments, flames were stabilized on the flat burner. Temperature profiles were measured with thin S-type thermocouples. Numerical simulations were performed with PREMIX code from CHEMKIN package. The comparison of the experimental and numerical data enabled to reveal the mechanism of NH₃/H₂ oxidation showing the best predictive capability. Experimental and numerical data showed that the nitrogen-containing species which are present in the post-flame zone are N₂ and NO whereas concentration of N₂O and NO₂ is negligible. It was revealed that in terms of NO reduction slightly rich conditions are more effective. In addition, the effect of equivalence ratio on the peak concentration of NO, N₂O and NO₂ was analyzed. Rich conditions appeared to be more effective to reduce peak concentrations of NO, N₂O and NO₂.

Keywords

ammonia, hydrogen, flame structure, mass-spectrometry

For citation

Osipova K. N., Shmakov A. G. Flame Structure of Ammonia/Hydrogen/Oxygen/Argon Mixtures at High Pressure. Siberian Journal of Physics. 2022. Vol. 17, no. 2, pp. 56–68. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-56-68

Введение

На сегодняшний день основу современной энергетики составляют ископаемые виды топлива. Однако их использование приводит к глобальному потеплению, в частности, из-за выбросов CO₂, вклад которого в эффект глобального потепления составляет 30% [1]. Для того, чтобы полностью решить проблему выбросов парниковых газов в атмосферу, необходимо использовать так называемые безуглеродные топлива [2]. Наиболее привлекательным из них является водород. Однако в природе нет месторождений ископаемого водорода, поэтому его необходимо получать искусственно, что препятствует его широкому использованию. Еще одной проблемой является потребность в сложном и дорогостоящем оборудовании для его сжижения и последующей транспортировки. Известно, что водород сжижается при давлении 350–700 атм, или при температуре –252,8 °С. Как можно видеть, такие условия действительно не способствуют широкому использованию водорода в качестве топлива.

Аммиак считается эффективным химическим носителем водорода [3]. Объемная плотность водорода в аммиаке выше, чем в жидком водороде [4]. В отличие от водорода, аммиак сжижается при давлении 8,5 атм при комнатной температуре или при атмосферном давлении и температуре –33 °С. Такие условия хранения являются более приемлемыми для потенциального широкого использования аммиака в качестве носителя водорода. Кроме того, в случае аммиака уже существует развитая инфраструктура его хранения и транспортировки. Однако аммиак как самостоятельное топливо имеет ряд недостатков, которые включают низкую скорость горения, примерно в пять раз ниже по сравнению с метаном, узкие пределы воспламенения и высокую минимальную энергию воспламенения, а из-за топливного азота, при горении аммиака, образуется большое количество оксидов азота. С точки зрения улучшения характеристик горения аммиака наиболее эффективной и «чистой» добавкой является водород, который

может быть получен из самого аммиака, например, его разложением в каталитическом реакторе и последующем отделении H_2 с помощью мембранного фильтра.

В литературе существует большое количество работ, посвященных изучению процессов горения и окисления аммиака. В данном обзоре, в основном, обсуждаются работы по влиянию добавки водорода на горение аммиака.

Согласно результатам работ [5; 6] максимальная скорость горения аммиачно-воздушных пламен составляет 7 см/с (атмосферное давление, комнатная температура). В работе [7] было установлено, что добавка водорода позволяет существенно увеличить скорость горения аммиака, при этом данный эффект наиболее выражен в случае богатых пламен. Вместе с тем нужно отметить, что с увеличением доли водорода в смеси скорость горения увеличивается экспоненциально [8; 9]. В работах [10; 11; 12] показано, что заметное увеличение скорости распространения пламен аммиака с добавкой водорода наблюдается, когда доля водорода в топливной смеси составляет более 0.3. Тем не менее, добавка водорода приводит к увеличению температуры в конечной зоне, что неизбежно приводит к увеличению концентрации оксидов азота в продуктах горения [7]. В работе [13] было показано, что эффект увеличения давления на величину скорости распространения пламени оказывается нелинейным. Также было установлено, что повышение температуры приводит к увеличению скорости пламен смесей аммиак/водород [14].

Добавка водорода к аммиаку позволяет уменьшить величину времени задержки воспламенения. Согласно работе [15] заметное уменьшение времени задержки воспламенения наблюдается при 10% водорода в смеси аммиак/водород. Однако в работе [16] показано, что добавка даже 5% водорода позволяет уменьшить время задержки воспламенения в 10 раз. Авторы работы [17] показали, что добавка 5% водорода приводит к снижению температуры самовоспламенения аммиачно-водородных смесей на 100К.

В недавней статье [18] исследовалось влияние добавки водорода на окисление аммиака в реакторе струйного перемешивания при атмосферном давлении. Доля водорода в смеси с аммиаком составляла до 70%. Было установлено, что добавка водорода к аммиаку приводит к снижению температуры начала окисления аммиака. В работе [19] также представлены данные по окислению смесей аммиак/водород в реакторе струйного перемешивания. Как и в предыдущей работе, эксперименты проводились при атмосферном давлении. Было установлено, что добавка 30% водорода позволяет снизить температуру начала окисления аммиака на ~250К. При этом изменение коэффициента избытка топлива слабо влияет на температуру начала интенсивного окисления аммиака.

В литературе можно выделить всего две работы по изучению химической структуры пламен аммиак/водород. В работе [20] структура пламен смесей аммиак/водород/кислород/аргон измерялась при низком давлении (50–120 мбар). Было показано, что добавка водорода не приводит к какому-либо заметному изменению состава продуктов горения. Переход к бедным смесям приводит к увеличению концентрации NO в конечной зоне пламени. В работе [21] представлены данные по структуре пламен аммиак/водород/кислород/аргон различной стехиометрии, полученные при атмосферном давлении. Установлено, что основными азотсодержащими компонентами, присутствующими в конечной зоне, являются молекулярный азот и NO, в то время как концентрация N_2O оказывается малой. Переход к богатым условиям горения позволяет снизить концентрацию NO в конечной зоне более, чем на порядок.

Представленный обзор показывает, что в литературе отсутствуют данные по структуре пламен смесей аммиак/водород при давлениях выше атмосферного. Поэтому целью настоящего исследования является получение новых экспериментальных данных по структуре пламен аммиак/водород при давлении 4 атм, а также проверка некоторых существующих детальных механизмов окисления и горения таких смесей. В данной работе проведен анализ влияния коэффициента избытка топлива на концентрацию оксидов азота в конечных продуктах горения.

Экспериментальная методика

Измерение химической структуры пламен предварительно перемешанных смесей аммиак/водород/кислород/аргон ($\varphi = 0,8; 1,0; 1,2$) при давлении 4 атм проводилось с помощью молекулярно-пучковой масс-спектрометрической установки с мягкой ионизацией электронным ударом. Поскольку детальное описание установки, системы стабилизации пламен, а также обработки данных представлены в предыдущих работах [22; 23; 24; 25], здесь будут приведены только основные детали.

Стабилизация пламен при высоких давлениях осуществлялась с использованием плоской горелки типа Бота-Сполдинга [26]. При проведении экспериментов температура горелки поддерживалась равной 368К. Горелка представляет собой перфорированный латунный диск, диаметр которого составляет 9,7 мм, толщина – 1,5 мм, диаметр отверстий – 0,2 мм, а расстояние между центрами отверстий составляет 0,28 мм. Как известно, при воздействии аммиака на сплавы меди образуются соединения, способные повлиять на процесс горения топливных смесей, содержащих аммиак, а также привести к коррозии материала горелки. Поэтому поверхность горелки была покрыта тонким слоем никеля, который препятствует взаимодействию аммиака с латунью на поверхности горелки. Для перемещения горелки в вертикальном направлении использовался механизм с микрометрическим винтом. Расстояние между поверхностью горелки и кончиком зонда измерялось при помощи катетометра, точность измерения составляет $\pm 0,01$ мм.

При проведении измерений структуры пламен при давлении 4 атм горелка помещалась в камеру высокого давления. Давление в камере поддерживалось при помощи сжатого азота. Данная камера позволяет проводить эксперименты при давлениях до 10 атм. В целях обеспечения оптического доступа камера была оборудована специальным окном, закрепленным при помощи бокового фланца. Азот, необходимый для поддержания давления в камере, подавался через этот фланец, чтобы предотвратить конденсацию воды на окне и тем самым обеспечить его прозрачность во время эксперимента. Давление в камере регулировалось при помощи диафрагменного регулятора давления на выпускной линии, при этом точность задания величины давления составляет 1%. Камера также была оборудована предохранительным клапаном и манометром для контроля давления. Верхний фланец камеры соединялся с фланцем, к которому был прикреплен зонд для отбора пробы из пламени.

Потоки компонентов газовой смеси задавались регуляторами расхода газа (Bronkhorst). Значения линейной скорости свежей смеси на поверхности горелки при различных давлениях подбирались так, чтобы визуально пламя было плоским и стабильным, а значения температуры в конечной зоне были максимально близкими друг к другу в пламенах разного стехиометрического состава. Это позволяет более точно проанализировать влияние давления и стехиометрии на структуру пламен, поскольку в таком случае эффект влияния температуры на структуру пламен оказывается незначительным.

Для отбора пробы из пламени использовался кварцевый зонд (внутренний угол раствора 40° и диаметр отверстия на кончике – 0,04 мм). Толщина стенок возле кончика зонда составляла 0,08 мм. Такие размеры позволяют уменьшить тепловые и аэродинамические возмущения, вносимые зондом в пламя. Отобранная зондом проба газа в виде молекулярного пучка проходит через скиммер, модулятор и коллиматор и поступает в ионный источник квадрупольного масс-спектрометра. Использование системы мягкой ионизации электронным ударом позволяет минимизировать эффект фрагментации ионов для большинства измеряемых пиков. Энергия ионизирующих электронов выбиралась отдельно для каждого вещества. Разброс значений энергии ионизирующих электронов составляет $\pm 0,25$ эВ.

В рамках данной работы были измерены профили концентрации следующих соединений: H_2 , NH_3 , O_2 , N_2 , H_2O , NO , N_2O , NO_2 .

Для того, чтобы для соединения i пересчитать интенсивность сигнала в масс-спектре (I_i) в мольную долю соединения (X_i), использовались зависящие от энергии ионизирующих электронов калибровочные коэффициенты, нормированные на коэффициент чувствительно-

сти по аргону (S/S_{Ar}). Таким образом: $I_i/I_{Ar} = S_i/S_{Ar} * X_i/X_{Ar}$. Поскольку в изучаемых смесях доля аргона достаточно велика, она считается постоянной.

Калибровочные коэффициенты для таких соединений, как H_2 , NH_3 , O_2 , N_2 , NO и N_2O были получены при помощи прямых калибровок с использованием газовых смесей известного состава. Калибровочный коэффициент для H_2O был получен из уравнения материального баланса для атома O. Для NO_2 расчет коэффициентов чувствительности осуществлялся при помощи метода отношений сечений ионизации. Значения сечения ионизации NO_2 было взято из базы данных NIST¹.

Точность изменения концентрации реагентов и основных продуктов горения составляет $\pm 20\%$ от величины их максимальной концентрации в пламени. Для N_2O и NO_2 точность измерений составляет $\pm 50\%$.

Профили температуры измерялись тонкими термопарами S-типа (Pt/Pt + 10%Rh), изготовленные из проволоки диаметром 30 μm . Спай термопары находился на фиксированном расстоянии 0,2 мм от кончика зонда. Для предотвращения протекания каталитических реакций на поверхности термопар они были покрыты тонким слоем SiO_2 . Детальное описание конструкции термопары и процедуры измерения температуры приведены в работах [27].

Чтобы учесть влияние зонда на пламя, а именно эффект газодинамических возмущений, экспериментальные профили веществ были сдвинуты в направлении поверхности горелки [23]. Для каждого пламени величина сдвига бралась одинаковой для всех веществ. В данной работе величина сдвига была равна $\sim 0,2$ мм.

Моделирование

Моделирование структуры пламен осуществлялось при помощи подпрограммы PREMIX из программного пакета CHEMKIN [28]. Величины параметров GRAD и CURV задавались равными 0,05. GRAD – это параметр расчетной сетки, который отвечает за количество точек в области с высоким градиентом. Меньшие значения этого параметра приводят к использованию большего количества точек сетки. CURV – параметр, отвечающий за количество точек сетки в области с высокой кривизной. Меньшие значения параметра CURV также приводят к использованию большего количества точек сетки. Таким образом, уменьшение параметров GRAD и CURV позволяет получить решение с большим количеством точек, и, соответственно, более гладкие расчетные кривые профилей мольных долей. При расчетах также учитывались эффекты мультикомпонентной диффузии, а также термодиффузии.

Для учета эффекта возмущений, вносимых пробоотборником, в качестве входных данных были использованы экспериментально измеренные профили температуры.

В данной работе были протестированы 4 детальных химико-кинетических механизма, взятых из литературы. В табл. 1 представлена основная информация об используемых механизмах:

Таблица 1

Химико-кинетические механизмы, используемые для моделирования структуры пламен $NH_3/H_2/O_2/Ar$

Модель №	Число соединений	Число реакций	Год	Ссылка
Модель 1	151	1397	2018	[29]
Модель 2	59	356	2018	[30]
Модель 3	127	1207	2010	[31], [24]
Модель 4	38	263	2021	[18]

¹ <https://www.nist.gov/pml/electron-impact-cross-sections-ionization-and-excitation-database>

Результаты

На рис. 1 представлены экспериментально измеренные профили температуры. В случае бедного пламени зона основных химических превращений составляет примерно 0,6–0,7 мм. Для стехиометрического пламени ширина зоны несколько увеличивается и составляет 0,7–0,8 мм. Богатое же пламя имеет ширину зоны равную 0,9 мм. Температура в конечной зоне для бедного пламени равна ~1800-1900 К. При этом для стехиометрического и богатого данная температура составляет ~1700-1800 К. Данные цифры говорят о том, что разница в значениях температуры в конечной зоне для изучаемых пламен составляет не более 100 К. Такое отличие в значении конечной температуры можно считать не очень существенным, что обосновывает возможность сравнения данных по структуре пламен смесей $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ с различными значениями φ , полученными в достаточно близких условиях.

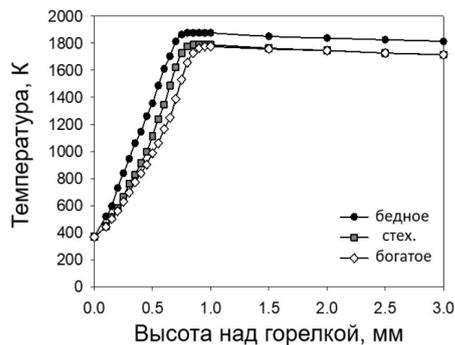


Рис. 1. Профили температуры для бедного, стехиометрического и богатого пламени $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ при давлении 4 атм

На рис. 2 представлены измеренные профили мольных долей компонентов топливной смеси (NH_3 и H_2), а также рассчитанные с использованием четырех детальных химико-кинетических механизмов.

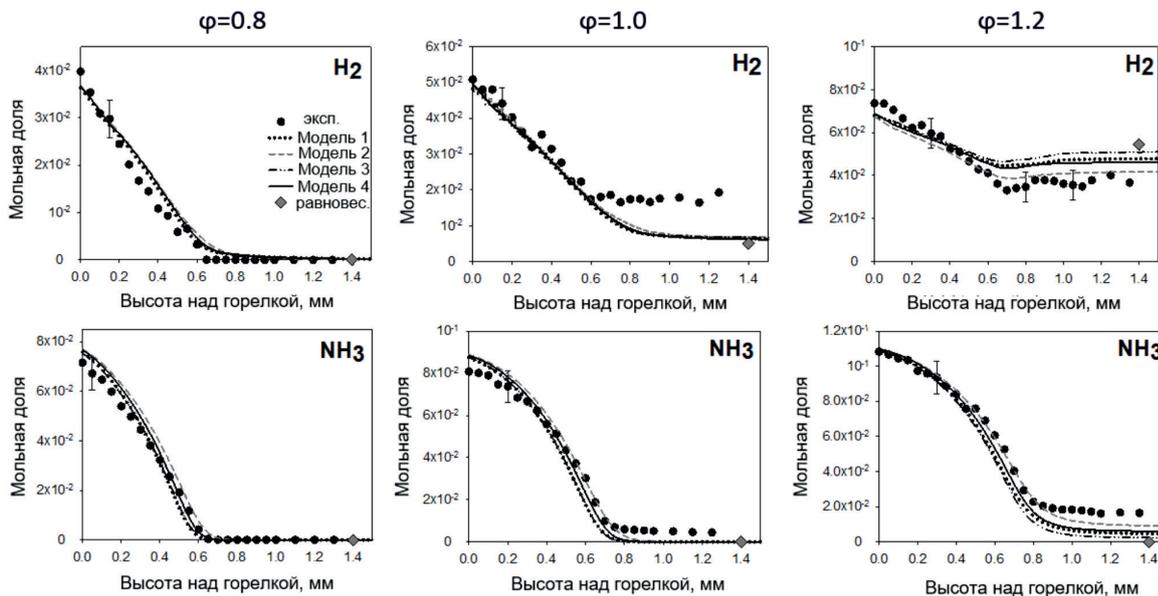


Рис. 2. Профили мольных долей H_2 и NH_3 для бедного, стехиометрического и богатого пламени $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ при давлении 4 атм

Сравнение экспериментальных и численных данных для профилей концентрации NH_3 и H_2 показывает, что в целом использованные механизмы хорошо описывают результаты измерений. Однако нужно обратить внимание на тот факт, что Модель 2, как и в случае пламен

при атмосферном давлении [21], предсказывает несколько более широкую зону расходования аммиака, чем это наблюдается в эксперименте. Приведенные экспериментальные и численные данные показывают, что в случае бедного пламени как аммиак, так и водород в зоне конечных продуктов расходуются полностью. В случае же стехиометрических условий аммиак расходуется также полностью, что видно из экспериментальных (с учетом ошибки эксперимента) и численных данных. В то же время некоторое остаточное количество водорода присутствует в зоне конечных продуктов. Сравнение экспериментальных и численных данных показывает, что в эксперименте остается несколько больше водорода, чем предсказывают использованные модели. Однако эта разница не очень существенная. Как было показано в работе [21], в кинетических схемах существуют реакции, описывающие образование водорода из молекулы аммиака. В случае же богатого пламени в зоне конечных продуктов присутствует небольшое количество аммиака, что наблюдается как для экспериментальных, так и для численных данных. Что касается водорода, то на его профиле присутствует небольшой перегиб. Кроме того, переход от $\varphi = 1,0$ к $\varphi = 1,2$ приводит к тому, что мольная доля водорода в зоне конечных продуктов увеличивается примерно в 2–4 раза.

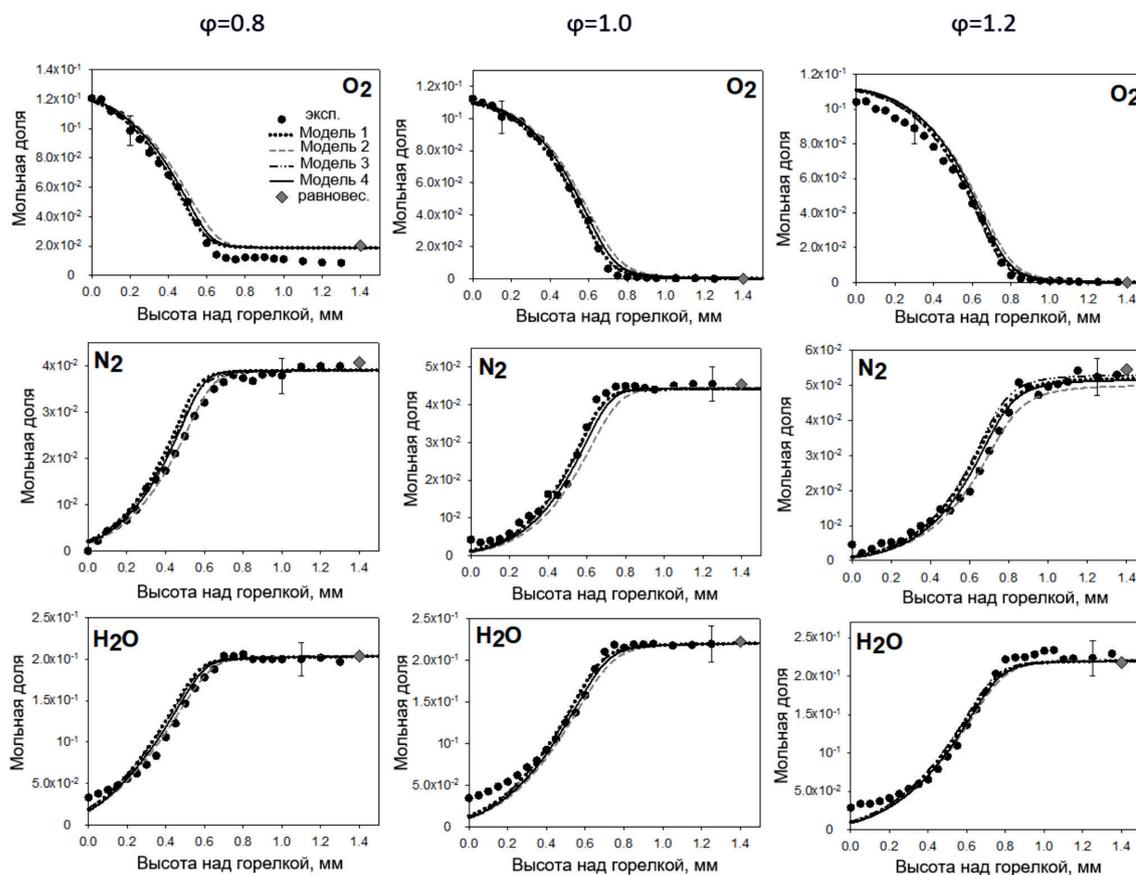


Рис. 3. Профили мольных долей O_2 , N_2 и H_2O для бедного, стехиометрического и богатого пламени $NH_3/H_2/O_2/Ar$ при давлении 4 атм

На рис. 3 представлены экспериментальные и численные профили мольных долей O_2 и основных продуктов окисления, таких как H_2O и N_2 в пламени $NH_3/H_2/O_2/Ar$ при 4 атм. Из приведенных графиков видно, что экспериментальные и численные данные хорошо согласуются между собой. В случае бедного пламени видно, что O_2 остается в зоне конечных продуктов, тогда как в случае стехиометрического и богатого пламен, как и ожидается, кислород практически полностью отсутствует в зоне конечных продуктов. Что касается профиля концентрации

N_2 , то при увеличении коэффициента избытка топлива можно увидеть незначительное увеличение концентрации молекулярного азота в зоне конечных продуктов. Так, в случае бедного пламени концентрация N_2 составляет $\sim 4 \cdot 10^{-2}$, в случае стехиометрического – $\sim 4,5 \cdot 10^{-2}$, а в случае богатого – $\sim 5 \cdot 10^{-2}$. Это происходит потому, что по мере увеличения коэффициента избытка топлива уменьшается количество доступного кислорода и увеличивается количество доступного аммиака, который является основным источником N_2 . Что же касается профиля концентрации воды, нужно отметить, что изменение коэффициента избытка топлива имеет слабо выраженный эффект на мольную долю воды в конченной зоне, которая равна $\sim 2 \cdot 10^{-1}$.

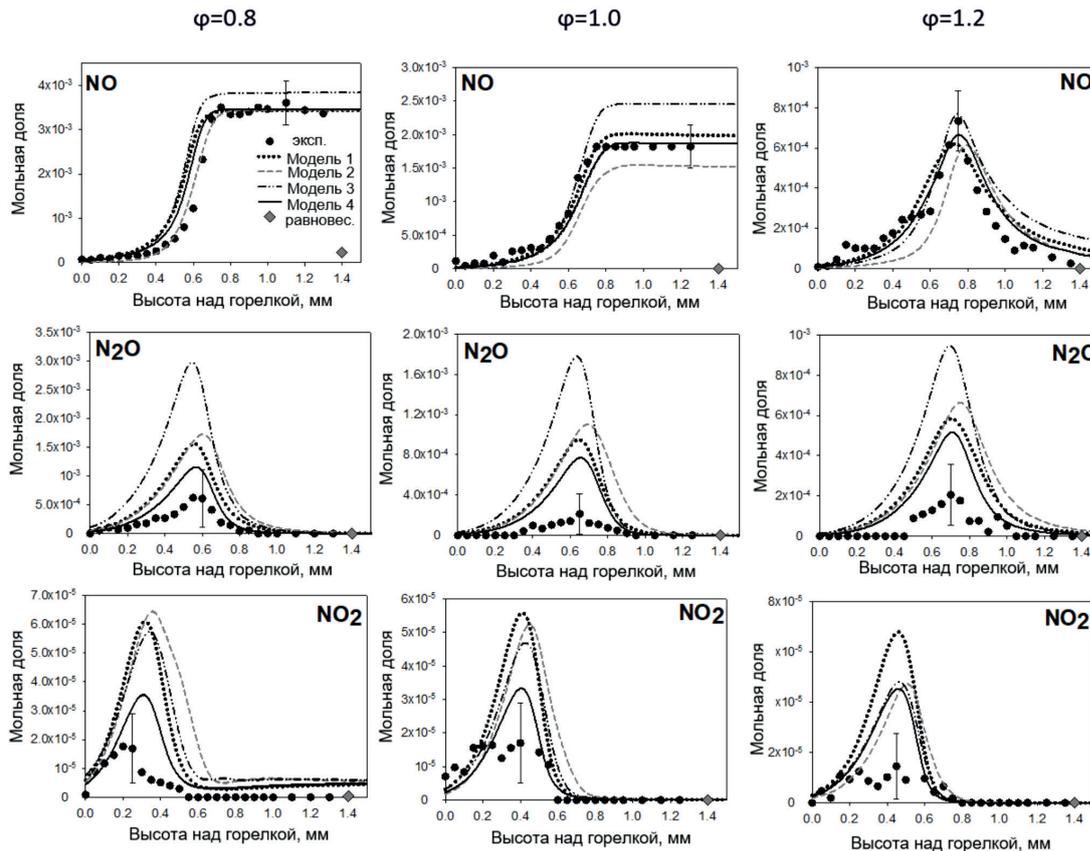


Рис. 4. Профили мольных долей NO, N_2O и NO_2 для бедного, стехиометрического и богатого пламени $NH_3/H_2/O_2/Ar$ при давлении 4 атм

На рис. 4 представлены измеренные и рассчитанные профили концентраций NO, N_2O и NO_2 , зарегистрированные в пламенах смесей $NH_3/H_2/O_2/Ar$.

Как было показано в работе [21], основным оксидом азота, который присутствует в заметной концентрации в зоне конечных продуктов горения, является NO. Аналогичная тенденция наблюдается и при повышении давления до 4-х атмосфер. В случае бедной смеси наблюдается хорошее согласие экспериментальных и численных данных. То же самое наблюдается и для случая стехиометрической смеси, хотя нужно отметить тот факт, что Модель 3 предсказывает несколько более высокую концентрацию NO в конечной зоне, чем это наблюдается в эксперименте. Что касается случая богатой смеси, то здесь наблюдается хорошее согласие экспериментальных и численных данных в плане описания формы профиля концентрации и положения максимума. В данном случае, согласно Модели 2, положение максимума концентрации NO оказывается несколько дальше, чем это наблюдается в эксперименте. Также нужно отметить, что все модели предсказывают практически одинаковое значение пиковой концентрации NO.

В случае N_2O для всех трех пламен наблюдается примерно одинаковая тенденция в плане согласия экспериментальных и численных данных. Все использованные механизмы адекватно предсказывают форму профиля и положение максимума концентрации. При этом положение максимальной мольной доли N_2O , полученное при помощи Модели 2, оказывается несколько дальше от поверхности горелки. Модель 3 предсказывает значение пиковой концентрации в $\sim 1,5-2$ раза выше, чем это наблюдается для других моделей. Что касается концентрации N_2O в конечной зоне, то, как и в работе [21], она оказывается незначительной $\sim 10^{-7}$. В случае NO_2 все использованные механизмы адекватно описывают как форму профиля мольной доли, так и положение максимума. Модель 2 предсказывает положение максимальной мольной доли на большем расстоянии, чем это наблюдается для других Моделей. В зоне конечных продуктов концентрация NO_2 равна $\sim 10^{-6}$ в случае бедного пламени, а в случае стехиометрического и богатого $\sim 10^{-8}$ и $\sim 10^{-12}$, соответственно.

Анализ образования оксидов азота при горении смеси $NH_3/H_2/O_2/Ar$

Как известно, одной из проблем потенциального использования аммиака в качестве топлива является наличие атома азота в его молекуле. Связанный азот неизбежно приводит к увеличению концентрации оксидов азота в выбросах. Поэтому с практической точки зрения необходимо выбирать оптимальный режим горения, который позволил бы снизить концентрацию данных веществ в конечных продуктах. В данном разделе приведен анализ влияния изменения коэффициента избытка топлива, а также анализ влияния давления на концентрацию оксидов азота в конечных продуктах горения и максимальной его концентрации в зоне окисления NH_3 .

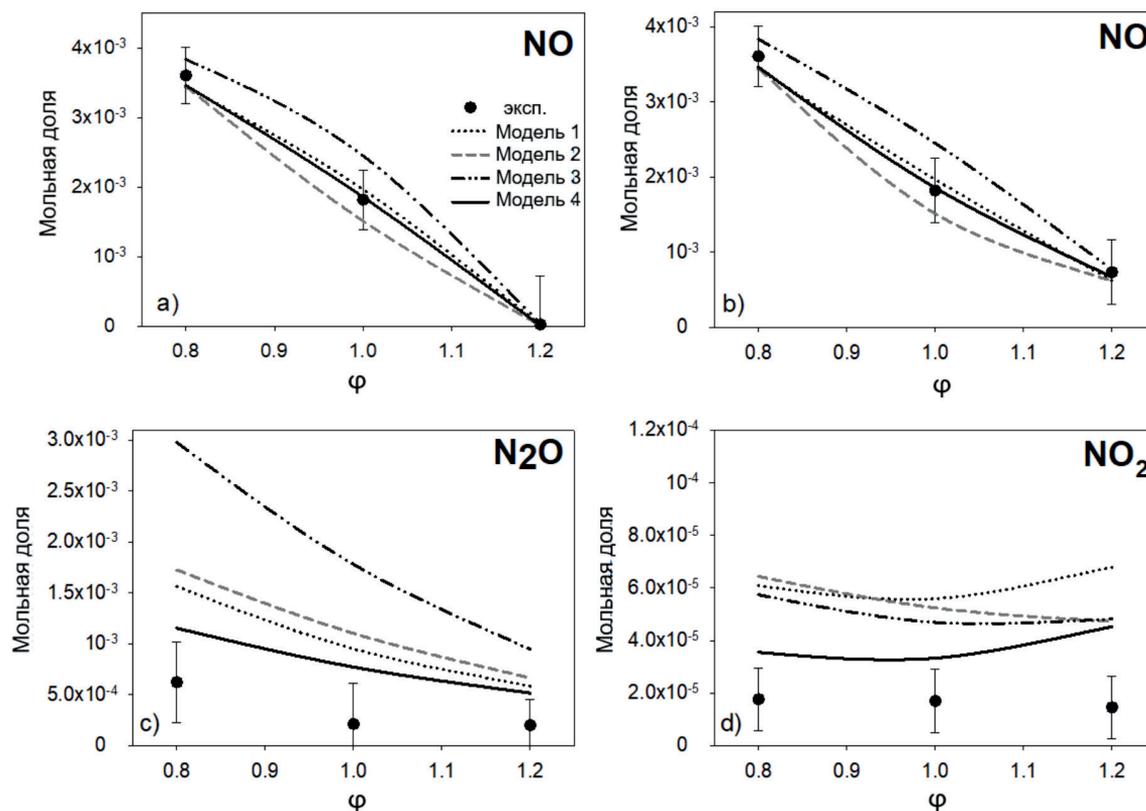


Рис. 5. Экспериментальные и численные значения концентрации NO в конечной зоне (а), а также пиковой концентрации NO (б), N_2O (с) и NO_2 (д) в пламени $NH_3/H_2/O_2/Ar$ в зависимости от ϕ при давлении 4 атм

На рис. 5 приведены экспериментальные и численные значения концентрации NO в конечной зоне, а также пиковой концентрации NO, N₂O и NO₂ в пламени NH₃/H₂/O₂/Ar в зависимости от коэффициента избытка топлива.

Как можно видеть из приведенных данных, переход от $\varphi = 0,8$ к $\varphi = 1,0$ приводит к снижению концентрации NO в конечной зоне \sim в 1,8 раза (рис. 5, а). Дальнейшее же увеличение коэффициента избытка топлива до значения 1,2 приводит к тому, что концентрация NO в конечной зоне оказывается на уровне $\approx 10^{-6}$. Эта тенденция воспроизводится всеми моделями, за исключением того факта, что Модель 3 предсказывает несколько завышенную концентрацию NO в конечной зоне для стехиометрической смеси. Приведенные данные показывают, что с точки зрения сокращения концентрации NO в выбросах необходимо переходить к богатым смесям. Однако, согласно рис. 4, в случае богатой смеси, профиль мольной доли NO имеет пик. Поскольку в реальных двигателях и горелочных устройствах возможна «закалка» продуктов горения (соответствующих зоне основных химических реакций) при их контакте с относительно холодными стенками камеры сгорания, то необходимо уделять также внимание влиянию условий горения на максимальные концентрации ключевых соединений в пламенах. Поэтому необходимо проанализировать также влияние изменения коэффициента избытка топлива на пиковую концентрацию NO.

На рис. 5, б приведены экспериментальные и численные значения пиковой концентрации NO в зависимости от коэффициента избытка топлива в пламенах смесей NH₃/H₂/O₂/Ar. Нужно отметить, что в случае бедной и стехиометрической смеси значение пиковой концентрации и концентрации NO в зоне конечных продуктов горения совпадают. Как и в случае данных для концентрации NO в конечной зоне, переход от $\varphi = 0,8$ к $\varphi = 1,0$ приводит к снижению концентрации NO \sim в 1,8 раза. Дальнейшее же увеличение коэффициента избытка топлива до значения 1,2 приводит к снижению пиковой концентрации NO \sim в 3,5 раза. Эта тенденция достаточно хорошо воспроизводится всеми моделями, за исключением того факта, что Модель 3 предсказывает несколько завышенную пиковую концентрацию NO для стехиометрической смеси. Приведенные данные показывают, что даже в случае анализа данных по пиковой концентрации NO, богатые смеси оказываются наиболее предпочтительными, поскольку пиковая концентрация NO оказывается всё равно ниже, чем в случае бедных и стехиометрических смесей.

Также в рамках данной работы были измерены профили концентрации N₂O и NO₂. Поскольку концентрация данных соединений в зоне конечных продуктов оказывается несущественной, в данном разделе представлен анализ влияния изменения коэффициента избытка топлива только на пиковую концентрацию данных веществ.

Из рис. 5, с видно, что согласно экспериментальным данным, переход от $\varphi = 0,8$ к $\varphi = 1,0$ приводит к снижению концентрации N₂O примерно в 3 раза. Дальнейшее увеличение коэффициента избытка топлива имеет очень слабое влияние на значение пиковой концентрации N₂O. Данная тенденция качественно воспроизводится всеми моделями. Однако нужно отметить, что кривая, полученная при помощи Моделей 1 и 2, имеет несколько больший наклон к горизонтальной оси, чем кривая, полученная при помощи Модели 4. В то же время кривая, полученная при помощи Модели 3, имеет ещё больший наклон к горизонтальной оси. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что, принимая во внимание погрешность измерений, наилучшего согласия экспериментальных и численных данных удастся добиться при использовании Модели 4.

На рис. 5, д приведены экспериментальные и численные значения пиковой концентрации NO₂ в зависимости от коэффициента избытка топлива в пламенах NH₃/H₂/O₂/Ar. Согласно Модели 1 переход от $\varphi = 0,8$ к $\varphi = 1,0$ практически не приводит к каким-либо изменениям пиковой концентрации NO₂. При $\varphi = 1,2$ наблюдается небольшое увеличение значения пиковой концентрации NO₂. В случае Модели 4 наблюдается аналогичная тенденция, однако абсолютные значения пиковой концентрации NO₂ оказываются в $\sim 1,5$ раза ниже. Что касается Моделей 2 и 3, то для них наблюдается противоположная тенденция. Так, для этих моделей наблю-

дается уменьшение концентрации NO_2 при переходе от бедной к стехиометрической смеси. Переход же от стехиометрических условий к богатым имеет более слабый эффект. Для данного соединения сложно говорить о количественном согласии экспериментальных и численных данных, а также о воспроизведении тенденции изменения пиковой концентрации NO_2 при изменении коэффициента избытка топлива. Как видно из эксперимента, пиковая концентрация NO_2 имеет значение порядка 10^{-5} , что близко к порогу чувствительности для установки, используемой в данной работе. Однако с учетом величины погрешности измерений, наиболее близкие к измеренным значениям пиковой концентрации NO_2 получаются при использовании Модели 4.

Выводы

1. Получены новые экспериментальные данные по структуре пламен смесей аммиак/водород/кислород/аргон различной стехиометрии при давлении 4 атм.
2. Установлено, что среди протестированных механизмов Модель 4 обеспечивает наилучшее согласие экспериментальных и численных данных.
3. Показано, что основными азотсодержащими соединениями, присутствующими в конечной зоне пламени являются N_2 и NO , в то время как концентрация N_2O и NO_2 оказывается довольно низкой.
4. Переход к богатому пламени ($\varphi = 1,2$) позволяет снизить концентрацию NO в конечной зоне пламени, а также пиковую концентрацию NO , N_2O и NO_2 в основной зоне химических превращений.

Список литературы / References

1. **Chen J., Fei Y., Wan Z.** The Relationship between the Development of Global Maritime Fleets and GHG Emission from Shipping. *J. Environ. Manage.*, 2019, vol. 242, p. 31–39.
2. **Kojima, Y.** Hydrogen Storage Materials for Hydrogen and Energy Carriers. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2019, vol 44(33), p. 18179–18192.
3. **Morlanés N., Katikaneni S. P., Paglieri S. N., Harale A., Solami B., Sarathy S. M., Gascon J.** A Technological Roadmap to the Ammonia Energy Economy: Current State and Missing Technologies. *Chem. Eng. J.*, 2021, vol. 408, p. 127310.
4. **Service R.** Liquid Sunshine. *Science*, 2018, vol. 361, p. 120–123.
5. **Takizawa K., Takahashi A., Tokuhashi K., Kondo S., Sekiya A.** Burning Velocity Measurements of Nitrogen-Containing Compounds. *J. Hazard. Mater.*, 2008, vol. 155(1), p. 144–152.
6. **Hayakawa A., Goto T., Mimoto R., Arakawa Y., Kudo T., Kobayashi H.** Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Ammonia/Air Premixed Flames at Various Pressures. *Fuel*, 2015, vol. 159, p. 98–106.
7. **Lee J. H., Kim J. H., Park J. H., Kwon O. C.** Studies on Properties of Laminar Premixed Hydrogen-Added Ammonia/Air Flames for Hydrogen Production. *Int. J. Hydrog. Energy.*, 2010, vol. 35(3), p. 1054–1064.
8. **Ichikawa A., Hayakawa A., Kitagawa Y., Somarathne K. D. K. A., Kudo T., Kobayashi H.** Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Ammonia/Hydrogen/Air Premixed Flames at Elevated Pressures. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2015, vol. 40 (30), p. 9570–9578.
9. **da Rocha R. C., Costa M., Bai X.-S.** Chemical Kinetic Modelling of Ammonia/Hydrogen/Air Ignition, Premixed Flame Propagation and NO Emission. *Fuel*, 2019, vol. 246, p. 24–33.
10. **Han X., Wang Z., Costa M., Sun Z., He Y., Cen K.** Experimental and Kinetic Modeling Study of Laminar Burning Velocities of NH_3/Air , $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{Air}$, $\text{NH}_3/\text{CO}/\text{Air}$ and $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ Premixed Flames. *Combust. Flame*, 2019, vol. 206, p. 214–226.
11. **Li J., Huang H., Kobayashi N., He Z., Nagai Y.** Study on Using Hydrogen and Ammonia as Fuels: Combustion Characteristics and NO_x Formation. *Int. J. Energy Res.*, 2014, vol. 38 (9), p. 1214–1223.

12. **Lee J.-B.; Lee S.-I.; Kwon O. C.** Effects of Ammonia Substitution on Hydrogen/Air Flame Propagation and Emissions. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2010, vol. 35, p. 11332–11341.
13. **Wang S., Wang Z., Elbaz A. M., Han X., He Y., Costa M., Konnov A. A., Roberts W. L.** Experimental Study and Kinetic Analysis of the Laminar Burning Velocity of $\text{NH}_3/\text{Syngas}/\text{Air}$, $\text{NH}_3/\text{CO}/\text{Air}$ and $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{Air}$ Premixed Flames at Elevated Pressures. *Combust. Flame*, 2020, vol. 221, p. 270–287.
14. **Lhuillier C., Brequigny P., Lamoureux N., Contino F., Mounaïm-Rousselle C.** Experimental Investigation on Laminar Burning Velocities of Ammonia/Hydrogen/Air Mixtures at Elevated Temperatures. *Fuel*, 2020, vol. 263, p. 116653.
15. **Shu B., Vallabhuni S. K., He X., Issayev G., Moshhammer K., Farooq A., Fernandes R. X. A.** Shock Tube and Modeling Study on the Autoignition Properties of Ammonia at Intermediate Temperatures. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37(1), p. 205–211.
16. **Dai L., Gersen S., Glarborg P., Levinsky H., Mokhov A.** Experimental and Numerical Analysis of the Autoignition Behavior of NH_3 and NH_3/H_2 Mixtures at High Pressure. *Combust. Flame*, 2020, vol. 215, p. 134–144.
17. **Mathieu O., Petersen E. L.** Experimental and Modeling Study on the High-Temperature Oxidation of Ammonia and Related NO_x Chemistry. *Combust. Flame*, 2015, vol. 162 (3), p. 554–570.
18. **Zhang X., Moosakutty S. P., Rajan R. P., Younes M., Sarathy S. M.** Combustion Chemistry of Ammonia/Hydrogen Mixtures: Jet-Stirred Reactor Measurements and Comprehensive Kinetic Modeling. *Combust. Flame*, 2021, vol. 234, p. 111653.
19. **Osipova K. N., Zhang X., Sarathy S. M., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G.** Ammonia and Ammonia/Hydrogen Blends Oxidation in a Jet-Stirred Reactor: Experimental and Numerical Study. *Fuel*, 2022, vol. 310, p. 122202.
20. **Duynslaegher C., Jeanmart H., Vandooren J.** Flame Structure Studies of Premixed Ammonia/Hydrogen/Oxygen/Argon Flames: Experimental and Numerical Investigation. *Proc. Combust. Inst.*, 2009, vol. 32 (1), p. 1277–1284.
21. **Osipova K. N., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G.** Chemical Structure and Laminar Burning Velocity of Atmospheric Pressure Premixed Ammonia/Hydrogen Flames. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2021, vol. 46 (80), p. 39942–39954.
22. **Dmitriev A. M., Osipova K. N., Knyazkov D. A., Gerasimov I. E., Shmakov A. G., Korobeinichev O. P.** Comparative Analysis of the Chemical Structure of Ethyl Butanoate and Methyl Pentanoate Flames. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2018, vol. 54 (2), p. 125–135.
23. **Gerasimov I. E., Knyazkov D. A., Yakimov S. A., Bolshova T. A., Shmakov A. G., Korobeinichev O. P.** Structure of Atmospheric-Pressure Fuel-Rich Premixed Ethylene Flame with and without Ethanol. *Combust. Flame*, 2012, vol. 159 (5), p. 1840–1850.
24. **Shmakov A. G., Korobeinichev O. P., Rybitskaya I. V., Chernov A. A., Knyazkov D. A., Bolshova T. A., Konnov A. A.** Formation and Consumption of NO in $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ Flames Doped with NO or NH_3 at Atmospheric Pressure. *Combust. Flame*, 2010, vol. 157(3), p. 556–565.
25. **Korobeinichev O. P., Shvartsberg V. M., Shmakov A. G., Knyazkov D. A., Rybitskaya I. V.** Inhibition of Atmospheric Lean and Rich $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{Ar}$ Flames by Phosphorus-Containing Compound. *Proc. Combust. Inst.*, 2007, vol. 31 (2), p. 2741–2748.
26. **Botha J. P., Spalding D. B., Egerton A. C.** The Laminar Flame Speed of Propane/Air Mixtures with Heat Extraction from the Flame. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.*, 1954, vol. 225(1160), p. 71–96.
27. **Korobeinichev O. P., Ilyin S. B., Mokrushin V. V., Shmakov A. G.** Destruction Chemistry of Dimethyl Methylphosphonate in $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ Flame Studied by Molecular Beam Mass Spectrometry. *Combust. Sci. Technol.*, 1996, vol. 116–117 (1–6), p. 51–67.
28. **Kee R. J., Rupley F. M., Miller J. A.** Chemkin-II: a fortran chemical kinetics package for the analysis of gas-phase chemical kinetics. Livermore, CA (USA): Sandia National Labs., 1989.

29. **Glarborg P., Miller J. A., Ruscic B., Klippenstein S. J.** Modeling Nitrogen Chemistry in Combustion. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2018, vol. 67, p. 31–68.
30. **Okafor E. C., Naito Y., Colson S., Ichikawa A., Kudo T., Hayakawa A., Kobayashi H.** Experimental and Numerical Study of the Laminar Burning Velocity of CH₄–NH₃–Air Premixed Flames. *Combust. Flame*, 2018, vol. 187, p. 185–198.
31. **Coppens F. H. V., De Ruyck J., Konnov A. A.** The Effects of Composition on Burning Velocity and Nitric Oxide Formation in Laminar Premixed Flames of CH₄ + H₂ + O₂ + N₂. *Combust. Flame*, 2007, vol. 149 (4), p. 409–417.

Сведения об авторах

Осипова Ксения Николаевна, аспирант, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (Новосибирск, Россия)

Шмаков Андрей Геннадьевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией Кинетики процессов горения, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Ksenia N. Osipova, PhD student, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Andrey G. Shmakov, Doctor of Sciences in Chemistry, Head of the Laboratory of Kinetics of Combustion Processes, Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Статья поступила в редакцию 03.03.2022;

одобрена после рецензирования 16.05.2022; принята к публикации 22.06.2022

The article was submitted 03.03.2022;

approved after reviewing 16.05.2022; accepted for publication 22.06.2022

Уважаемые читатели журнала!

Следуя объявленной в первом выпуске 17-го тома СФЖ серии статей, посвященных 60-летию физического факультета НГУ, в учебно-методическом разделе второго выпуска журнала мы продолжаем опубликование информационного материала, в котором нашло отражение состояния подготовки научно-инженерных кадров в следующих подразделениях факультета: кафедра аэрофизики и газовой динамики, кафедра квантовой электроники, кафедра физики сплошных сред, а также межфакультетская лаборатория демонстраций и компьютерного сопровождения. В последующих выпусках СФЖ мы продолжим далее информировать читателей об учебно-методической работе в других подразделениях физфака.

А. В. Аржанников
главный редактор журнала

Учебно-методическая статья
УДК 621.373.8262
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-70-74

Кафедра квантовой электроники ФФ НГУ
Сергей Николаевич Багаев¹, Илья Игоревич Бетеров²,
Андрей Николаевич Гончаров³, Сергей Васильевич Чепуров⁴,
Алексей Владимирович Тайченачев⁵

¹⁻⁵Институт лазерной физики СО РАН, проспект академика Лаврентьева,
Новосибирск, Россия

^{1-3,5}Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, проспект академика Лаврентьева,
Новосибирск, Россия

¹bagayev@laser.nsc.ru; ²beterov@isp.nsc.ru
³goncharov_an@ngs.ru; ⁴svc972@gmail.com
⁵bagayev@laser.nsc.ru

Аннотация

Деятельность кафедры квантовой электроники ФФ НГУ нацелена на подготовку высококвалифицированных кадров в области современной лазерной физики и техники, прецизионной лазерной метрологии, и квантовых технологий в целом. Кафедра базируется в Институте лазерной физики СО РАН.

Ключевые слова

квантовая электроника, лазерная физика, лазерная метрология, лазерное охлаждение, квантовые технологии

Для цитирования

Багаев С. Н., Бетеров И. И., Гончаров А. Н., Чепуров С. В., Тайченачев А. В. Кафедра квантовой электроники ФФ НГУ. // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 70–74. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-70-74

Chair of Quantum Electronics of Faculty of Physics NSU

Sergey N. Bagayev¹, Ilya I. Beterov²,
Andrew N. Goncharov³, Sergey V. Chepurov⁴,
Alexei V. Taichenachev⁵

¹⁻⁵Institute of Laser Physics SB RAS, prosp. Acad. Lavrentieva,
Novosibirsk, Russian Federation

^{1-3,5}Novosibirsk State University,
Novosibirsk, Russian Federation

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

¹bagayev@laser.nsc.ru; ²beterov@isp.nsc.ru
³goncharov_an@ngs.ru; ⁴svc972@gmail.com
⁵bagayev@laser.nsc.ru

Abstract

Chair of Quantum Electronics of Faculty of Physics of NSU educates highly-qualified researchers in modern laser physics and laser technologies, high-precision laser metrology and quantum technologies in general. The chair is based at the Institute of Laser Physics SB RAS.

Keywords

quantum electronics, laser physics, laser metrology, laser cooling, quantum technologies

For citation

Bagayev S. N., Beterov I. I., Goncharov A. N., Chepurov S. V., Taichenachev A. V. Chair of Quantum Electronics of Faculty of Physics NSU. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 70–74. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-70-74

© Багаев С. Н., Бетеров И. И., Гончаров А. Н., Чепуров С. В., Тайченачев А. В., 2022

ISSN 2541-9447

Сибирский физический журнал. 2022. Том 17, № 2
Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 2

Кафедра квантовой электроники ФФ НГУ основана в 1999 году академиком РАН Сергеем Николаевичем Багаевым и базируется в Институте лазерной физики СО РАН. Исторически, проблемы квантовой электроники – это в первую очередь физика квантовых генераторов – лазеров и мазеров – и их применение в современной технике. Сегодня лазерное излучение используется для широкого спектра технических задач – передачи и оптической обработки информации, лазерной обработки материалов, метрологии, фотохимии, спектроскопии и лазерной диагностике. Отдельно следует выделить применение лазеров в медицине, включая лазерную хирургию, офтальмологию.

Наиболее важные научные задачи, решаемые исследователями, работающими на кафедре квантовой электроники ФФ НГУ, относятся к лазерной спектроскопии сверхвысокого разрешения. Получение узких и стабильных по частоте резонансных линий в спектрах поглощения или испускания вещества существенно расширяет наши знания о структуре и свойствах вещества, и дает технические возможности для сверхточного измерения частоты и времени. Благодаря этому возможны фундаментальные исследования постоянства физических констант, создание новых технологий для метрологии и навигации. Эти работы были отмечены Государственной премией РФ в области науки и техники за 1998 г. (присуждена С. Н. Багаеву, Е. В. Бакланову, В. М. Клементьеву в составе коллектива авторов за работу «Создание ультрастабильных по частоте лазеров, средств измерения оптических частот и их применение в прецизионных измерениях»). Работы по прецизионной лазерной спектроскопии, отмеченные Нобелевской премией по физике в 2005 году, во многом базировались на результатах новосибирских физиков, что было признано в Нобелевских лекциях [1; 2].



Рис. 1. Заведующий кафедрой академик РАН

Сергей Николаевич Багаев
Fig. 1. Head of the Chair academician Sergey Nikolaevich Bagayev

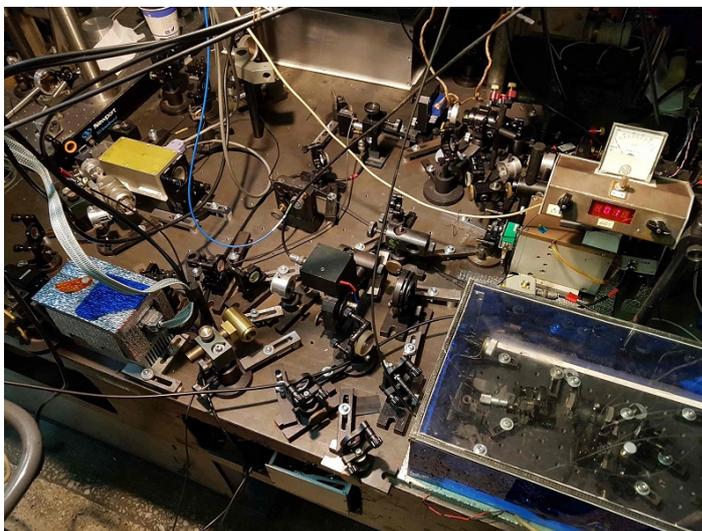


Рис. 2. Лазерная система для оптического стандарта частоты на основе ультрахолодных атомов магния
Fig. 2. Laser system for optical frequency standard based on ultracold magnesium atoms

Основные научные направления исследований в Институте лазерной физики СО РАН, который является базовым для кафедры квантовой электроники, – это лазерная спектроскопия

сверхвысокого разрешения и ее приложения, лазерные стандарты частоты и лазерная метрология, твердотельные и полупроводниковые лазерные системы, материалы квантовой электроники, генерация фемтосекундных импульсов, создание мощных технологических лазеров, лазерные системы для биомедицинских приложений.

Значительный прогресс в развитии квантовой электроники и лазерной спектроскопии связан с появлением методов лазерного охлаждения, отмеченных Нобелевской премией по физике в 1997 году [3]. Лазерное охлаждение позволило получить температуры менее ста микрокельвин, что не может быть достигнуто никакими другими методами. Вещество в таком состоянии может рассматриваться как «замороженный газ», для которого практически отсутствует эффект Доплера в оптическом диапазоне. Это открыло возможности для дальнейшего повышения точности атомных часов [4] и других приложений, среди которых выделяются квантовые вычисления. В последние годы появились экспериментальные методы создания упорядоченных массивов ультрахолодных атомов и точного управления квантовыми состояниями атомов. Такие атомы могут рассматриваться как логические элементы квантового компьютера – кубиты [5].

Квантовые технологии на основе интерференции ультрахолодных атомов являются базовыми для создания нового поколения сверхчувствительных и высокоточных датчиков (сенсоров) ускорения, гравитации, вращения и оптических стандартов частоты. Особый интерес эти датчики представляют для таких практических приложений, как навигация, в том числе инерциальная, дистанционное зондирование Земли, геофизика и поиск полезных ископаемых. Высокочувствительные датчики инерциальных сил и высокопрецизионные стандарты частоты являются важными инструментами также и для фундаментальных исследований. Исследованиями по разработке квантовых сенсоров и их применению занимаются за рубежом во многих научных и коммерческих организациях. В ИЛФ СО РАН ведется работа по созданию экспериментальной базы для квантовых сенсоров на основе интерференции ультрахолодных атомов и прецизионной лазерной спектроскопии, разработка, исследование и изготовление прототипов таких сенсоров. Особое значение имеет разработка прототипа абсолютного квантового гравиметра на основе ультрахолодных атомов рубидия.

В последнее десятилетие достигнут существенный прогресс в повышении стабильности и точности оптических стандартов частоты с использованием локализованных в пространстве охлажденных до сверхнизких температур атомов и ионов. Долговременная нестабильность частоты таких систем достигает 10^{-18} . Ключевым преимуществом таких стандартов является то, что атом или ион, имеющий в своей структуре энергетических уровней запрещенный сверхузкий переход, используемый в качестве оптического частотного репера, находится в хорошо контролируемой среде, в значительной мере изолированной от внешних воздействий.

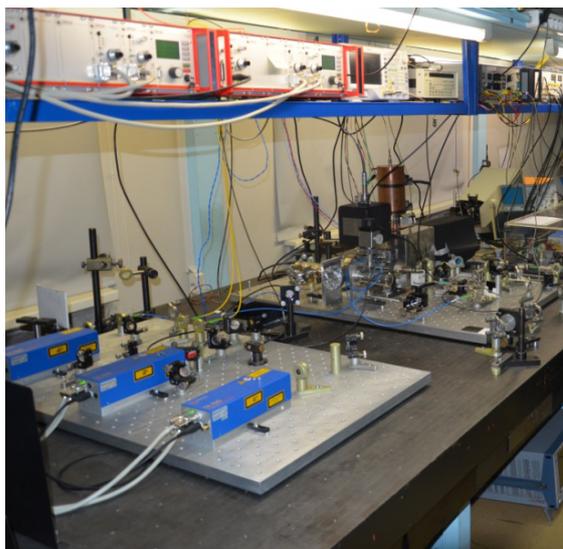


Рис. 3. Оптический стандарт частоты на основе одиночных ионов иттербия

Fig. 3. Optical standard based on a single ytterbium ion

Институт лазерной физики СО РАН и его научный коллектив занимают лидирующие позиции в России и в мире в области спектроскопии сверхвысокого разрешения, оптических стандартов частоты и атомной оптики. Создан первый в России оптический стандарт частоты на одиночном ионе иттербия-171 с суточной нестабильностью порядка 10^{-17} , коллективом института впервые предложены новые методы

спектроскопии сверхузких запрещенных оптических переходов и подавления паразитных частотных сдвигов.

Сегодня студенты, обучающиеся на кафедре квантовой электроники, работают с уникальными экспериментальными установками. Исследователи, работающие на кафедре, создают сложнейшие прецизионные лазерные системы, работа с которыми требует высочайшей квалификации. Установки такого класса используются в ведущих мировых научных центрах для решения научно-технических задач на переднем крае физики. Спецкурсы кафедры нацелены на обучение исследователей, прекрасно знающих квантовую физику и ее приложения в оптике и спектроскопии, умеющих конструировать и настраивать сложные лазерные системы, применять и разрабатывать электронные системы управления свойствами лазерного излучения, решать классические оптические задачи, детально анализировать результаты эксперимента и строить теоретические модели для описания экспериментов.

Новое направление, которое реализуется на кафедре, – квантовые информационные технологии. Сегодня особенно важны работы по созданию элементной базы квантовых вычислений. Для этого широко используются квантовые оптические методы и методы квантовой нанопластики. Спецкурсы в области квантовых информационных технологий знакомят студентов с основными принципами квантовых вычислений и квантовой криптографии, квантовым машинным обучением, методами квантовой метрологии на основе лазерного охлаждения, твердотельными реализациями квантовых вычислений. Для преподавания в рамках новой магистерской программы привлечены также исследователи из ИФП СО РАН, ИАиЭ СО РАН и НГТУ.

На базе кафедры действуют программы всех уровней – бакалавриата, магистратуры и аспирантуры. Все три уровня предполагают практику студентов и аспирантов в лабораториях ИЛФ СО РАН и профильных лабораториях других институтов СО РАН. Работы исследователей кафедры широко признаны международным сообществом. Благодаря этому с участием преподавателей кафедры создана международная магистерская программа Quantum Optics and Nanoscience, которая в настоящее время модернизируется. Сотрудники кафедры руководят магистрантами и аспирантами из Франции, Индии, Египта, КНР.

Регулярные события с участием сотрудников кафедры – Международный симпозиум и школа для молодых ученых «Современные проблемы лазерной физики» и Всероссийская конференция «Физика ультрахолодных атомов». В рамках симпозиума и школы молодые исследователи слушают лекции ведущих российских и зарубежных исследователей в области современной лазерной физики, имеют возможность личного общения с ведущими российскими и зарубежными учеными. Симпозиум проводится регулярно, и соответствует всем критериям высокого международного уровня. Конференция по физике лазерного охлаждения – единственное в России мероприятие такого профиля, имеющее значительный авторитет и выходящее на международный уровень.

Выпускники кафедры квантовой электроники успешно работают в институтах СО РАН, ведущих российских и зарубежных научных центрах. Их сильные стороны – фундаментальное знание физики и умение анализировать условия конкретного эксперимента, способность решать нетривиальные задачи при создании уникальных экспериментальных установок, умение

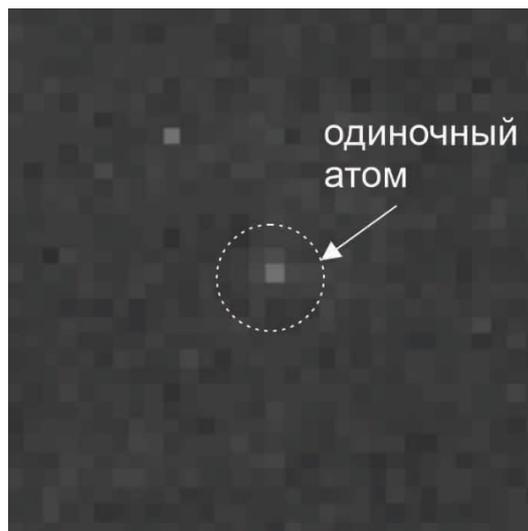


Рис. 4. Флуоресценция атомного кубита
Fig. 4. Fluorescence of the atomic qubit

автоматизировать эксперимент и решать сложные задачи управления лазерным излучением, широкий научный кругозор.

Список литературы

1. **Хэнш Т. В.** Страсть к точности // УФН. 2006. Т. 176. выпуск 12. С. 1368–1380.
2. **Холл Д.** Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов – и не только // УФН. 2006. Т. 176. вып. 12. С. 1353–1367.
3. **Филлипс В. Д.** Лазерное охлаждение и пленение нейтральных атомов // УФН. 1999. Т. 169. выпуск 3. С. 305–322.
4. **Тайченачев А. В., Юдин В. И., Багаев С. Н.** Сверхточные оптические стандарты частоты на ультрахолодных атомах: состояние и перспективы // УФН. 2016. Т. 186. выпуск 2. С. 193–205.
5. **Бетеров И. И., Якшина Е. А., Третьяков Д. Б., Энтин В. М., Альянова Н. В., Митянин К. Ю., Фарук А. М., Рябцев И. И.** Реализация однокубитовых квантовых операций с индивидуальной адресацией двух атомов рубидия в двух оптических дипольных ловушках // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. Выпуск 6. С. 464–472.

Сведения об авторах

Багаев Сергей Николаевич, академик РАН, доктор физико-математических наук, Институт лазерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия)

Бетеров Илья Игоревич, кандидат физико-математических наук, Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (Новосибирск, Россия)

Гончаров Андрей Николаевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт лазерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия)

Чепуров Сергей Васильевич, ведущий научный сотрудник, Институт лазерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия)

Тайченачев Алексей Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Институт лазерной физики СО РАН (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Sergey N. Bagayev, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Laser Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Ilya I. Beterov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Semiconductor Physics n. a. A.V. Rzhanova SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Andrew N. Goncharov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, head of laboratory, Institute of Laser Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Sergey V. Chepurov, Leading Researcher, Institute of Laser Physics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Alexei V. Taichenachev, Corresponding Member of the Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Laser Physics SB RAS Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 18.11.2021;
одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 18.11.2021;
approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 22.06.2022*

Учебно-методическая статья
УДК 538.9
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-75-80

Кафедра физических методов исследования твёрдого тела физического факультета НГУ

Сергей Васильевич Цыбуля

ФИЦ Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН
Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия
sergey.tsybulya@yandex.ru

Аннотация

Статья посвящена кафедре физических методов исследования твёрдого тела физического факультета НГУ, базовыми институтами которой являются ФИЦ Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН и Институт неорганической химии имени А. В. Николаева СО РАН. Рассказывается об истории создания кафедры, её преподавателях и направлениях их научных исследований, об изучаемых студентами дисциплинах. Читатель может ознакомиться со списком магистерских программ, существующих на кафедре, а также достижениями её выпускников и перспективами дальнейшего развития.

Ключевые слова

высшее образование, методы исследования, твердое тело, дифракция, спектроскопия, микроскопия, синхротронное излучение

Для цитирования

Цыбуля С. В. Кафедра физических методов исследования твёрдого тела физического факультета НГУ // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 75–80. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-75-80

Section of Physical Methods of Solid State Research of the Department of Physics of Novosibirsk State University

Sergey V. Tsybulya

Federal Research Center, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS
Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation
sergey.tsybulya@yandex.ru

Abstract

The article is devoted to the Department of Physical Methods for Solid Research of the Physics Department of Novosibirsk State University, the basic institutes of which are the Boreskov Institute of Catalysis and the Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science. It tells about the history of the foundation of the department, its lecturers and the directions of their scientific research, and also about the disciplines studied. The reader can get acquainted with the list of department's master's programs and with the achievements of its graduates and the prospects for further development.

Keywords

higher education, research methods, solid state, diffraction, spectroscopy, microscopy, synchrotron radiation

For citation

Tsybulya S. V. Section of Physical Methods of Solid State Research of the Department of Physics of Novosibirsk State University. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 75–80. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-75-80

История становления кафедры

Кафедра физических методов исследования твёрдого тела – самая молодая по времени создания кафедра физического факультета. Первый набор бакалавров и магистрантов по новой специализации, открытой первоначально при кафедре общей физики, состоялся в 2007 г. В 2009 г. специализация была преобразована в отдельную кафедру.

Создание кафедры было инициировано автором этих строк при активном содействии профессора Андрея Васильевича Аржанникова, декана физического факультета того периода. Серьезную поддержку при создании кафедры оказали академики Валентин Николаевич Пармон и Владимир Вячеславович Болдырев, возглавлявшие в то время ведущие институты химического профиля: Институт катализа им. Г. К. Борескова (ИК СО РАН) и Институт химии твёрдого тела и механохимии (ИХТТМ СО РАН). Руководство Института неорганической химии им. А. В. Николаева также обратилось с письмом поддержки к Учёному совету физического факультета. Сотрудники этих трех институтов составляли (вплоть до настоящего момента) костяк коллектива преподавателей кафедры.

Чтобы понять, почему именно химики обратились с такой просьбой к руководству НГУ и руководству физического факультета, нужно вспомнить известную триаду химических исследований – «синтез-структура-свойства». Понять те или иные свойства синтезированных объектов (и природных минералов также) невозможно без детальной характеристики их структуры (кристаллической структуры, структуры поверхности, микро/нано структуры, характерных дефектов различной природы и т. д.). Исследования с применением комплекса физических методов являются неотъемлемой частью научных исследований в организациях (научных и научно-производственных), занимающихся синтезом различных химических продуктов и/или материалов.

Например, в ИК СО РАН в то время отдел физико-химических исследований включал в себя до десятка лабораторий, занимавшихся дифракционными, спектроскопическими, электронно-микроскопическими и другими исследованиями катализаторов, с общей численностью около 25 % всех научных сотрудников института. Но многие из специалистов среднего и старшего возрастов были выпускниками далеких от Новосибирска университетов Москвы, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Ростова-на-Дону, приехавшими в Академгородок еще в советские времена. Нужно было обеспечить приток молодых кадров по этим востребованным научным специальностям для обеспечения, в первую очередь, междисциплинарных исследований. И в целом кафедра со своей задачей справилась – сегодня выпускники кафедры работают в пяти институтах СО РАН, в компаниях Технопарка, преподают в НГУ. Некоторые продолжили свое обучение и научную карьеру в Москве или за рубежом.

На сегодняшнем этапе востребованность специалистов, имеющих базовые знания по теории и практике использования различных физических методов для исследования состава и структуры разнообразных объектов кратно возрастает. Создание источника синхротронного излучения поколения 4+ в Новосибирской области (СКИФ) предполагает, что в ближайшие годы после его запуска должно сформироваться научное сообщество российских и зарубежных исследователей, активно использующих новые, во многом уникальные, экспериментальные возможности для решения актуальных задач в различных сферах науки и технологий. Сам Центр СКИФ призван стать экспериментальной базой для подготовки и переподготовки кадров в содружестве с заинтересованными учебными учреждениями, в первую очередь, с НГУ. И роль кафедры физических методов исследования твёрдого тела в процессе подготовки специалистов для синхротронных исследований в междисциплинарных областях является ключевой.

Особенности преподавания и структура курсов

Принципиальная идея при составлении изначального учебного плана кафедры состояла в том, чтобы дать обучающимся в бакалавриате базовые знания (понимание физических принципов, возможностей, ограничений) по основным физическим методам исследования твердых тел – рентгеновской дифракции, рентгеновской, инфракрасной спектроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, магнито-резонансным методам, электронной микроскопии, термическому анализу и др. Знание основ широкого круга методов позволяет исследователю подходить осмысленно к их применению при решении тех или иных научных и практических задач, обеспечивая необходимую полноту информации об изучаемых объектах.

При этом углубленное (профессиональное) изучение одного из методов студенты бакалавриата получают при выполнении курсовых и дипломных работ, проходя практику в исследовательских лабораториях академических институтов и НГУ. Таким образом, чрезвычайно важная роль отводится научным руководителям. В качестве таковых кафедрой привлекались и привлекаются лучшие профессионалы в своей области, занимающиеся решением конкретных исследовательских задач либо развитием новых методик.

Список дисциплин бакалавриата мало изменился с момента создания кафедры. По учебному плану 2021/2022 г. студенты изучают на третьем курсе следующие дисциплины: «Основы кристаллографии и структурного анализа», «Введение в рентгенографию поликристаллов», «Колебательная ИК и КР спектроскопия», «Дефекты в кристаллах». На четвертом курсе ведутся дисциплины «Магнитные свойства вещества», «Рентгеновские спектральные методы», «Электронная микроскопия», «Современные ЦКП на базе источников синхротронного излучения».

Важно отметить, что в каждом семестре студенты также проходят спецпрактикум. Лабораторные работы практикумов, как правило, сопряжены с теми теоретическими дисциплинами, которые читаются в данном семестре.

Обучение в магистратуре физического факультета строится, как известно, на основе индивидуальных образовательных траекторий. Кафедра физических методов исследования твёрдого тела (КФМИТТ) предлагает дисциплины, которые могут составить отдельную магистерскую программу, но могут быть и дисциплинами по выбору для магистрантов, обучающихся на других кафедрах. В настоящее время КФМИТТ – единственная из кафедр физического факультета, которая реализует междисциплинарную магистерскую программу совместно с кафедрой другого факультета – кафедрой химии твёрдого тела (КХТТ) ФЕН НГУ. Магистерская программа «Методическое обеспечение физико-химических исследований конденсированных фаз» стартовала в 2019 г., и её главное предназначение – подготовка кадров для работы на синхротронных и нейтронных источниках, в перспективе – на исследовательских станциях СКИФ. Обучающимся предлагается широкий набор дисциплин, читаемых как преподавателями КФМИТТ ФФ, так и КХТТ ФЕН: «Методы высокоэнергетической спектроскопии», «Методы кристаллоструктурных исследований», «Синхротронное излучение в структурных исследованиях», «Структурный анализ нанокристаллов», «Основы теории функционала плотности», «ЯМР спектроскопия твёрдого тела», «Основные принципы научного материаловедения», «Конструирование».

Практика студентов, бакалавров и магистрантов проходит в хорошо оснащенных современным научно-исследовательским оборудованием лабораториях институтов СО РАН и НГУ. Следует отметить, что студенты могут проходить практику и выполнять свои квалификационные работы не только в базовых институтах, поименованных в заголовке статьи, но и в других институтах СО РАН, а также в компаниях Технопарка, имеющих исследовательские подразделения, соответствующие профилю кафедры. В процессе обучения магистранты имеют возможность осуществлять поездки с образовательными или научными целями в европейские центры синхротронных исследований.

Кадровый состав кафедры

Среди тех, кто стоял у истоков создания кафедры, и кто по-прежнему трудится на ней: д.ф.-м.н., профессор С. А. Громилов, д.х.н. Б. А. Колесов, д.х.н. О. Б. Лапина, д.ф.-м.н. А. Н. Шмаков, к.ф.-м.н. В. В. Каичев, к.х.н. В. И. Зайковский, к.х.н. А. А. Матвиенко, к.ф.-м.н. С. Н. Трухан, к.ф.-м.н. А. А. Шубин, к.х.н. А. Н. Саланов. К сожалению, на кафедре больше не работает д.ф.-м.н., профессор Л. Н. Мазалов, по разным причинам сейчас не преподают д.х.н. О. Н. Мартынов, к.х.н. В. А. Дребущак, к.ф.-м.н. С. В. Черепанова. Эти коллеги также очень много сделали для становления кафедры.

С другой стороны, с началом реализация проекта СКИФ наш преподавательский состав пополнился такими замечательными специалистами в области синхротронных методов исследования, как: д.ф.-м.н. Я. В. Зубавичус, к.г.-м.н. С. В. Ращенко; с 2020 г. новый курс «Основы теории функционала плотности» читает д.х.н. И. Л. Зильберберг. Целый ряд дисциплин в магистратуре (в рамках совместной междисциплинарной магистерской программы) ведут преподаватели кафедры химии твёрдого тела ФЕН НГУ, возглавляемой академиком РАН В. В. Болдыревым: д.х.н. Б. А. Захаров, к.х.н. Т. Ю. Кардаш, к.х.н. И. А. Туманов; д.х.н., проф. Е. В. Болдырева является одним из основных разработчиков и со-руководителем магистерской программы «Методическое обеспечение физико-химических исследований конденсированных фаз». Дисциплину «Конструирование», пользующуюся очень большой популярностью у магистрантов разных кафедр ФФ, ведет М. С. Бондарь.

Молодое поколение преподавателей кафедры составляют, прежде всего, наши выпускники, которые теперь уже сами стали высококвалифицированными специалистами в своих областях: к.ф.-м.н. Е. Ю. Герасимов, к.ф.-м.н. А. А. Сараев, к.ф.-м.н. С. С. Якушкин, к.ф.-м.н. Д. А. Яценко. Активное участие в работе кафедры принимают к.х.н. О. А. Булавченко, к.х.н. В. П. Пахарукова, к.ф.-м.н. П. В. Гейдт, занимаясь проведением практических занятий и руководством студентов. К проведению практических занятий привлекаются к.ф.-м.н. А. С. Сухих, к.х.н. А. В. Ищенко, И. В. Яковлев. Отдельно хотелось бы отметить важную роль секретаря кафедры В. В. Никулина, осуществляющего все коммуникации как с преподавателями, так и со студентами.

Научные направления

Практически все преподаватели кафедры являются научными сотрудниками институтов СО РАН. Область их научных интересов весьма широкая и связана с научной тематикой институтов.

Основные направления исследований:

- структурные, кристаллохимические исследования синтетических соединений и минералов, их трансформации в условиях воздействия газовой среды, температуры, давления, жесткого излучения;
- фундаментальные основы направленного дизайна новых функциональных материалов, а также новых способов их получения, обработки и диагностики в режимах *in situ* и *operando*;
- фундаментальные основы разработки новых катализаторов для различных химических технологий;
- структурные механизмы быстропротекающих процессов с высоким временным разрешением;
- новые радиационные технологии с использованием современных ускорителей;
- развитие приборно-инструментальной базы для оснащения экспериментальных станций источников синхротронного излучения и нейтронов;
- разработка программного обеспечения, реализующего новые методики анализа дифракционных и спектральных экспериментов.

Эти направления исследований можно объединить в два основных связанных друг с другом блока:

- развитие приборно-инструментальной и методической базы для выполнения исследований с использованием источников СИ и нейтронов;
- фундаментальные исследования структуры функциональных материалов, высокоэнергетических веществ, катализаторов, в том числе, в условиях их функционирования и в экстремальных условиях.

Непосредственно при кафедре создана лаборатория структурной диагностики ультрадисперсных и наноструктурированных систем (ЛСДУиНС). Лаборатория принимала активное участие в реализации Программы «Проект 5-100» и в настоящее время включилась в реализацию Программы «Приоритет-2030» в рамках стратегического проекта «Радиационные технологии будущего». Помимо этого, сотрудниками лаборатории выполнялись гранты РФФИ, гранты по программам поддержки молодых ученых.

Достижения и перспективы

Главное достижение кафедры – ее выпускники, среди которых уже 15 кандидатов наук, хотя студентам первого набора на сегодняшний день едва исполнилось 35 лет. Сегодня это сотрудники ИК, ИНХ, ИХТТМ, ИФП СО РАН, довольно большое число наших выпускников работает или продолжает учебу в университетах и научных центрах Германии, Нидерландов, Израиля, Швейцарии. Некоторые из выпускников кафедры, как отмечалось выше, уже сами являются преподавателями в НГУ (и не только на КФМИТТ).

С началом реализации проекта СКИФ значительное число преподавателей и выпускников кафедры так или иначе привлечено к работам по этому проекту. Непосредственно сотрудниками СКИФ, занимающимися сегодня разработкой исследовательских станций, являются А. Н. Шмаков, А. А. Сараев, З. С. Винокуров, И. А. Четырин. Именно с перспективами создания СКИФ связаны и перспективы развития кафедры. С 2022/23 учебного года кафедра планирует реализовывать новые дисциплины по выбору для всего потока магистрантов ФФ: «Основы проектирования станций на установках мегасайенс», «Физические методы исследования твёрдого тела с использованием синхротронного излучения», «Актуальные направления исследований на установках класса мегасайенс».

В планах кафедры сформировать, опираясь на существующие и вновь создаваемые дисциплины, новую магистерскую программу «Синхротронные методы исследования» с отдельным набором магистрантов. Наша мечта, которую мы сейчас активно продвигаем в повестку развития ЦКП «СКИФ», – создание учебно-научной станции НГУ в числе станций второй очереди этого проекта. В среднесрочной и долговременной перспективе планируемая станция должна стать базовым элементом в практической подготовке научных и научно-технических кадров для синхротронных исследований, потребность в которых будет только нарастать.

Заключение

В 2022 г. кафедра физических методов исследования твёрдого тела будет отмечать пятнадцатилетие первого набора обучающихся. Мы не стали самой большой (и, наверное, не стали самой популярной) кафедрой ФФ за эти годы, но мы занимаем сегодня достойное место на факультете и выполняем важную функцию подготовки уникальных специалистов, востребованных именно в областях междисциплинарных исследований – в физическом и химическом материаловедении, химии твёрдого тела, минералогии и т. д. Кафедра имеет ясные перспективы и планы развития, ориентируясь, как и было задумано изначально, на подготовку специалистов, способных вести исследования в междисциплинарных областях с использованием самых современных физических методов.

Сведения об авторе

Цыбуля Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФИЦ Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН (Новосибирск, Россия), заведующий кафедрой физических методов исследования твёрдого тела физического факультета, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Information about the Author

Sergey V. Tsybulya, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Major Researcher, Borekov Institute of Catalysis SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation), Head of Department of Physical Methods for Solid Research, Physics Department, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 25.11.2021;
одобрена после рецензирования 10.06.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 25.11.2021;
approved after reviewing 10.06.2022; accepted for publication 22.06.2022*

Учебно-методическая статья
УДК 532, 539, 620.1
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-81-92

Кафедра физики сплошных сред

Евгений Иванович Пальчиков¹,
Мария Станиславовна Котельникова²

¹⁻²Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирск, Россия

¹⁻²Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹Palchikov@academ.org

²m.kotelnikova@g.nsu.ru

Аннотация

Статья рассказывает об истории создания кафедры физики сплошных сред физического факультета НГУ, научных достижениях ее сотрудников и выпускников, методике подготовки специалистов, научных направлениях, развиваемых на кафедре.

Ключевые слова

кафедра физики сплошных сред, Институт гидродинамики СО РАН

Для цитирования

Пальчиков Е. И., Котельникова М. С. Кафедра физики сплошных сред // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 81–92. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-81-92

Chair of Continuous Media Physics

Evgeniy I. Palchikov¹,
Maria S. Kotelnikova²

¹⁻²Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹⁻²Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹Palchikov@academ.org

²m.kotelnikova@g.nsu.ru

Abstract

The paper talks about the history of the creation of the Chair of Continuous Media Physics of the Physics Department of NSU, the scientific achievements of its employees and graduates, the teaching methods and hints, the fields of interest in science.

Keywords

Chair of Continuous Media Physics, Institute of Hydrodynamics SB RAS

For citation

Palchikov E. I., Kotelnikova M. S. Chair of Continuous Media Physics. Siberian Journal of Physics, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 81–92. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-81-92

История кафедры

Кафедра физики сплошных сред основана на физическом факультете НГУ в 1965 г. по инициативе академика М. А. Лаврентьева с целью подготовки квалифицированных специалистов по ряду направлений современной гидро- и газодинамики, физике сплошной среды и механике импульсных, в том числе взрывных, процессов в газообразных и конденсированных средах.

Первым заведующим кафедрой (до 1990 г. – кафедра физики быстропротекающих процессов) был профессор Б. В. Войцеховский (впоследствии академик РАН). С 1971 г. по 1990 г. и с 1992 г. по 2014 г. кафедру возглавлял академик В. М. Титов, а в период 1990–1992 гг. – профессор В. Ф. Нестеренко. В этот период кафедра называлась кафедрой физики взрыва, позднее она получила сегодняшнее наименование. В 2014 г. кафедру физики сплошных сред возглавил профессор Е. И. Пальчиков. Базовыми для кафедры являются лаборатории Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН.



Рис. 1. Заведующие кафедрой физики сплошных сред в разные годы: академик Б. В. Войцеховский, академик В. М. Титов, профессор В. Ф. Нестеренко, профессор Е.И. Пальчиков (слева направо)

Fig. 1. Heads of the Chair of Continuous Media Physics in different years: academician B. V. Voitkhovskiy, academician V. M. Titov, professor V. F. Nesterenko, Professor E. I. Palchikov (from left to right)

Кафедра готовит специалистов экспериментального и теоретико-расчетного профиля в области физики и механики высокоэнергетичных процессов в сплошной среде (твердые тела, жидкости и газы) и в гетерогенных дисперсных средах. В сферу интересов специалистов кафедры и ее выпускников попадают динамично развивающиеся научные направления: физика ударных волн и детонационных волн, физика фазовых переходов при динамическом воздействии, разнообразные кумулятивные процессы, в том числе магнитная кумуляция и реализация экстремальных величин тока и напряженности магнитного поля, гидродинамика многофазных и неньютоновских жидкостей.

На кафедре работают 6 профессоров и 4 доцента, все преподаватели кафедры одновременно являются научными сотрудниками, активно работающими в области физики сплошных сред и физики взрыва. За время существования кафедры на ней защитили дипломные работы около 300 студентов, более 20 выпускников получили степень доктора наук, а более 80 защитили кандидатские диссертации. Сотрудники кафедры и ее выпускники получили Ленинскую премию и Государственную премию СССР, 3 премии Совета Министров СССР, Государственную премию России, 8 премий им. Ленинского комсомола.

Выпускники кафедры могут заниматься научными и прикладными исследованиями в следующих областях: физика и механика импульсных процессов при экстремально высоких давлениях и температурах, газовая динамика, кумулятивные процессы, численное моделирование ударно-волновых и детонационных течений в сплошных средах, подводный взрыв и кавитационные явления, сварка и обработка материалов взрывом, ударно-волновой синтез новых материалов и динамическое компактирование порошковых материалов, преобразование химической энергии взрыва в электромагнитную, ударные и детонационные волны в дву- и многофазных средах, разработка методов диагностики быстропротекающих процессов.

В настоящее время в тематике выпускных квалификационных работ выпускников кафедры преобладают такие активно развивающиеся направления как исследования быстропротекающих процессов с помощью синхротронного излучения и гидравлического разрыва пласта. Учитывая смещение акцентов в сторону изучения фундаментальных процессов физики сплошной среды, выпускники кафедры могут работать не только в традиционных (для указанных направлений) организациях, но и в исследовательских институтах и вузах, разрабатывающих широкий спектр проблем физики и механики сплошных сред, а также в крупнейших нефтегазодобывающих компаниях и их научно-технических центрах.

Достижения сотрудников и выпускников кафедры

В начальный период основной задачей кафедры было обеспечение институтов СО РАН необходимыми специалистами. Эта задача была успешно решена. Сегодня выпускники кафедры составляют ядро исследователей трех отделов Института гидродинамики, работают в Институте теоретической и прикладной механики, Институте горного дела, Институте теплофизики, Институте прикладной физики, КТИ гидроимпульсной техники, СФУ в Красноярске, Федеральном ядерном центре в г. Снежинск, в НИИ городов Бийска, Томска, Нефтеюганска, а также в Калифорнийском университете, Университете Дьюка в США, Университете Йорка в Великобритании и др.

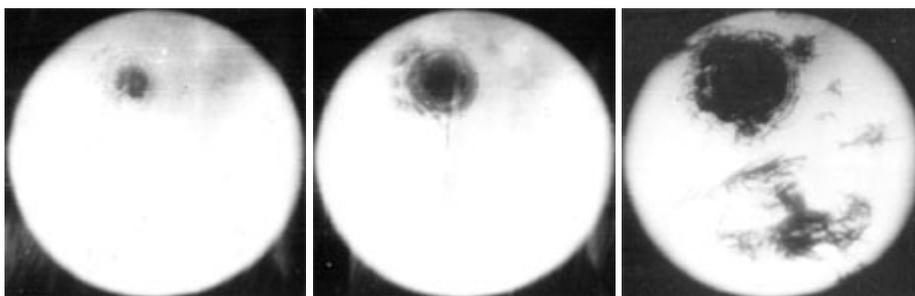


Рис. 2. Полученные с помощью высокоскоростной камеры снимки взаимодействия метеорита с иллюминатором на различных стадиях

Fig. 2. Images of the interaction of the meteorite with glass at various stages obtained with a high-speed camera

Выпускники кафедры во многом определили плодотворное развитие в СО РАН ряда приоритетных научных и научно-технических направлений. Так, например, исследование в лабораторных условиях явления высокоскоростного удара при скоростях взаимодействия

до 10–14 км/с стало возможным благодаря технологии получения космических скоростей, основанный на использовании кумулятивных зарядов и было проведено впервые В. М. Титовым и Г. А. Швецовым [1], по результатам этих работ были получены первые отечественные рекомендации по метеоритной безопасности и защите космической техники.

Изучение специалистами кафедры процесса высокоскоростной деформации материалов породило целое научно-техническое направление динамической обработки материалов, включающее сварку взрывом, упрочнение взрывом, динамическое компактирование материалов и пр. У истоков создания этих прорывных для своего времени технологий стояли: Дерибас А. А., Биченков Е. И., Тришин Ю. А. [2], Яковлев В. И. [3], Ульяницкий В. Ю. [4] и другие.

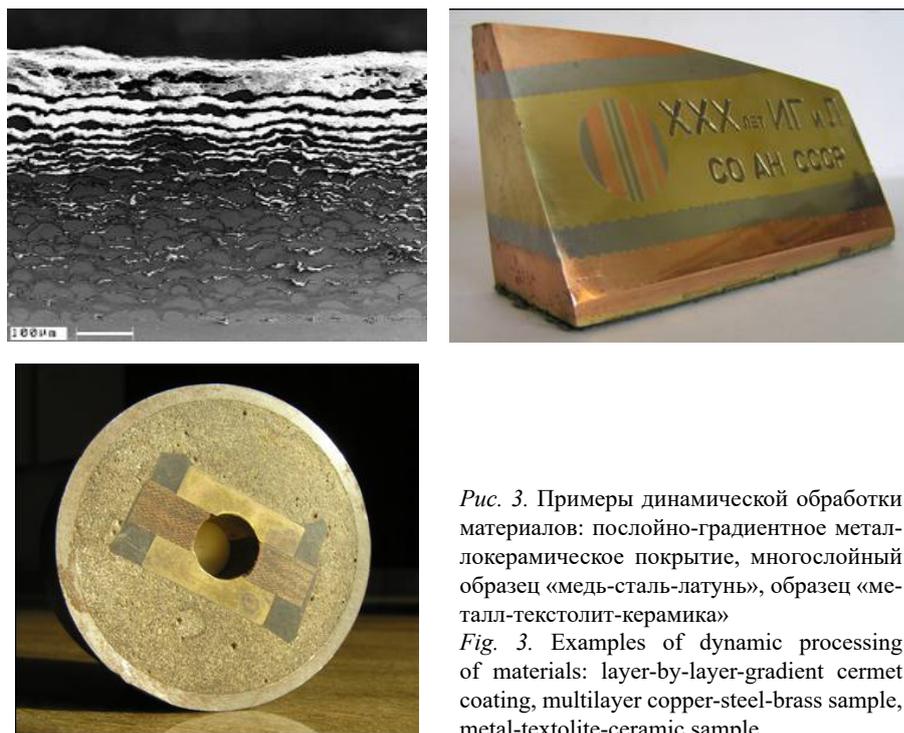


Рис. 3. Примеры динамической обработки материалов: послойно-градиентное металлокерамическое покрытие, многослойный образец «медь-сталь-латунь», образец «металл-текстолит-керамика»

Fig. 3. Examples of dynamic processing of materials: layer-by-layer-gradient cermet coating, multilayer copper-steel-brass sample, metal-textolite-ceramic sample

В воспоминаниях М. А. Лаврентьева сказано, что одной из первых установок в Институте гидродинамики была установка по изучению детонации (взрыва) газа в цилиндрической трубе. На базе нее была экспериментально обнаружена и объяснена неустойчивость детонационной волны в газовых смесях. Открытие и объяснение поперечных волн как основного элемента сложной структуры реальной детонационной волны послужило базой последующего развития теории многофронтной детонации. Выявленные Б. В. Войцеховским совместно с Р. И. Солоухиным, В. В. Митрофановым и М. Е. Топчианом [5; 6; 7] особенности механизма многофронтной и спиновой детонации служат основой при создании реактивных двигателей нового поколения, работающих на режимах детонационного сгорания смеси.

Б. В. Войцеховский некоторое время занимался построением теоретической модели образования шаровой молнии, для объяснения природы таких явлений как огни святого Эльма и шаровая молния им были поставлены и выполнены фундаментальные эксперименты, моделирующие атмосферное электричество [8; 9].

Уникальную разработку прямого метода получения искусственных алмазов в детонационной волне из углерода, входящего в состав молекул взрывчатого вещества, в Институте гидродинамики вели А. М. Ставер, В. М. Титов, А. И. Лямкин и А. П. Ершов, совместно с сотрудниками Красноярского научного центра СО РАН [10]. На основе этого метода в Научно-производственном объединении «Алтай» было создано первое в мире промышленное производство по синтезу ультрадисперсных синтетических алмазов.



Рис. 4. Б. В. Войцеховский демонстрирует эффект образования огней святого Эльма в своей лаборатории
Fig. 4. B. V. Voitsekhovskiy demonstrates the effect of the formation of St. Elmo's fire in his laboratory

Исследование физики процесса детонации порошковых ВВ [11; 12] позволило группе под руководством Л. А. Лукьянчикова разработать новый тип безопасных нетоксичных электродетонаторов типа ЭДВ (выпускаются серийно) и ЭДН (проведены первичные промышленные испытания, выпущена партия 0,5 млн шт., предназначены для геоло-горазведочных работ) и систем неэлектрического взрывания СИНВ, используемых в горной промышленности страны, серийное производство которых развернуто в г. Новосибирске. внедрение технологии гидро-взрывной многоимпульсной штамповки деталей самолетов из нержавеющей стали и титановых сплавов на ГАЗ им. С. Орджоникидзе (г. Горький), и ФУП «Чкаловский завод» (г. Новосибирск); обнаружение факта высокой пробойной прочности продуктов взрыва и гашения дуги, что позволило начать широкое использование взрывных размыкателей тока в научно-технических целях.

Разработка Е. И. Биченковым и Е. И. Пальчиковым импульсных рентгеновских аппаратов [13; 14] завершилась изготовлением опытной партии новой серии аппаратов ПИР-600 и ПИР-100 для исследования высокоскоростных процессов, освоенных в серийном производстве на НПО «Спектр» (Министерство приборостроения СССР) и запатентованных в ряде стран.

Благодаря работам под руководством профессора М. Е. Топчияна [15] появилось новое поколение гиперзвуковых аэродинамических труб ударного действия, обеспечивающее максимальное приближение к натуральным числам Рейнольдса, необходимым для моделирования полетных условий в диапазоне чисел Маха $M = 6-24$.

Исследования профессоров кафедры В. В. Митрофанова и А. А. Васильева по инициированию и распространению волн детонации в открытом пространстве [16; 17] были удостоены Государственной премии РФ. Ими были созданы модели объемной детонации, изучены поля давлений и импульсов, генерируемых детонационными взрывами газовых облаков в окружающей атмосфере, разработаны приближенные модели для оценки детонационной опасности различных горючих смесей.

Уникальная технология резки отработавших срок сборок ТВЭЛов АЭС при помощи высокоскоростных струй, созданная Б. В. Войцеховским, В. В. Митрофановым и В. Л. Истоминым [18], позволила создать автоматизированный комплекс измельчения и удаления радиоактивных сборок ТВЭЛов. Комплекс обеспечивает переработку всех существующих типов отработавших сборок ядерных реакторов АЭС и транспортных энергетических установок, а также транспортировку твердых радиоактивных отходов в спецмогильник.

В. И. Долгов был удостоен Государственной премии СССР за серию работ по созданию технологии комплексной переработки оловосодержащего сырья. Примененные им закономерности гидродинамических течений в узких каналах позволили разработать новые технологические процессы и аппараты центробежного рафинирования цветных металлов и их сплавов, с помощью которых были получены рекордные в мире показатели извлечения таких металлов как олово, цинк, свинец, висмут.

Уникальные исследования преобразования энергии взрыва в электромагнитную, начатые В. М. Титовым и развитые в лаборатории под руководством Г. А. Швецова, позволили найти решение проблемы разрушения кумулятивной струи при помощи мощного импульса тока, разработать электромагнитные методов ускорения твердых тел, получить в лабораторных условиях сверхсильные импульсные магнитные поля и токи [19; 20].



Рис. 5. Примеры тушения пожаров на скважинах взрыво-порошковым способом
Fig. 5. Examples of extinguishing fires in wells using the explosive powder method

Опыт, накопленный в лаборатории возглавляемой Б. А. Луговцовым, при исследовании вихревых колец, позволил предложить новый способ тушения газовых и нефтяных пожаров [21]. Высота факела при пожаре на скважине достигает 80–100 м и имеет максимальный диаметр 10–15 м, если создать вихревое кольцо, движущееся вдоль оси факела снизу вверх, то при таком движении «атмосфера» вихревого кольца сдувает пламя и пожар прекращается. Такие вихревые кольца могут быть получены с помощью взрыва небольших зарядов взрывчатого вещества. Взрыво-порошковый способ позволяет значительно сократить время тушения пожаров.

Сотрудники и выпускники кафедры принимали активное участие в ряде приоритетных оборонных программ: разработка перспективных кумулятивных систем, исследование особенностей разрушения ледовых покрытий при динамическом нагружении с целью использования оборонных комплексов в условиях Арктики, разработка элементов пневмотранспорта для перемещения специзделий, разработка динамической антикумулятивной защиты (активной брони) [22].

Как следует из далеко не полного перечня, тематика научной работы кафедры всегда была связана с современными как научными, так и техническими задачами. О высоком уровне подготовки специалистов на кафедре свидетельствует также то, что наши выпускники востребованы как руководители не только в России: профессор А. А. Васильев возглавлял Института гидродинамики СО РАН, профессор В. И. Кирко был директором НИИФТИ при Красноярском государственном университете, д.т.н. В. В. Андреев – заместителем главного технолога завода «Искра» (Новосибирск); но и за рубежом: д-р физ.-мат. наук В. А. Владимиров возглавлял Институт прикладной математики Университета г. Халл (Великобритания), д-р физ.-мат. наук В. Ф. Нестеренко стал ведущим профессором Калифорнийского университета (г. Сан-Диего, США), к.ф.-м.н. А. Д. Реснянский – руководителем лаборатории Отдела систем вооружений (г. Эдинбург, Австралия).

Наши выпускники являются также членами редколлегии ведущих российских журналов: профессор Г. А. Швецов – журнал «Прикладная математика и техническая физика», к.ф.-м.н. С. М. Караханов – журнал «Физика горения и взрыва», переводимых за рубежом и занимающих неплохое место в рейтинге отечественных научных изданий.

Выпускники кафедры ведут активную преподавательскую деятельность в вузах Новосибирска: Новосибирском государственном университете, Новосибирском государственном техническом университете, Высшем колледже информатики, Югорском и Сибирском федеральном университетах и в ряде других вузов страны.

Технология подготовки специалистов

На кафедре преподавали и преподают не просто профессионалы своего дела, но и активно работающие в науке ученые различных возрастов. Поэтому программы спецкурсов и тематика дипломных работ выпускников кафедры всегда соответствовали актуальным проблемам, связанные с планами научно-исследовательских работ базового Института и прикладными разработками. Студенты кафедры выполняют квалификационные работы непосредственно в научно-исследовательских подразделениях Института, используют те же приборы, оборудование и методики исследований, что и научные сотрудники Института, работают в особой, научно-технической среде, способствующей развитию у них творческих способностей, самостоятельности, умению принимать решения, активно отстаивать и защищать результаты своих исследований.

Все спецкурсы на кафедре физики сплошных сред разбиты на две группы в соответствии с системой «бакалавр – магистр». На первой ступени специального обучения при подготовке бакалавров студенты третьего и четвертого курсов слушают базовые спецкурсы, без которых

немыслима подготовка специалистов высокого уровня в области физики и механики быстропротекающих процессов.

На третьем курсе это прежде всего: «Введение в механику импульсных процессов», «Газовая динамика», «Теория детонации», «Экспериментальные методы исследований», «Ударные волны в конденсированных средах». Спецкурсы дают представление о языке этого научного направления, о тех основных понятиях, физических моделях и явлениях, методах исследования, с которыми приходится сталкиваться будущим выпускникам при подготовке квалификационных работ.

В первом семестре четвертого курса студенты знакомятся с более специальными вопросами на спецкурсах «Гидродинамические аспекты физики взрыва», «Физические явления при ударном сжатии», «Избранные главы взрывной магнитной гидродинамики». Последний семестр четвертого курса практически полностью освобожден от спецкурсов для того, чтобы студенты имели возможность выполнить выпускную квалификационную работу, читается один курс – «Энергоемкие материалы».

Преддипломную практику студенты кафедры начинают со второй половины третьего курса, когда они выбирают тему дипломной работы, предлагаемую будущим научным руководителем. Это либо преподаватель кафедры, либо любой научный сотрудник (как правило, лица, имеющие ученую степень). После выбора руководителя студенты начинают более углубленно знакомиться с содержанием предполагаемой работы.

Учебная программа магистратуры дополнена рядом курсов, на которых рассматриваются специальные вопросы физики быстропротекающих процессов и сплошных сред, такими как «Взрывчатые вещества», «Численные методы механики сплошных сред», «Современная гидродинамика», «Взрыв и новые материалы», также читаются продолжения курсов «Газовая динамика» и «Теория детонации».



Рис. 6. Студенты лаборатории физики взрыва ИГиЛ СО РАН Кирилл Новоселов, Аркадий Хорунженко, Алексей Студенников и научный руководитель К.А. Тен (выпускник кафедры 1973 г.) с представителем РФЯЦ-ВНИИТФ на конференции в г. Снежинск

Fig. 6. Students of the Explosion Physics Laboratory Kirill Novoselov, Arkady Khorunzhenko, Alexey Studennikov and scientific adviser K.A. Ten (a graduate of the department) with a representative of RFNC-VNIITF at a conference in Snezhinsk

Рис. 7. Выпускники кафедры к.ф.-м.н. А. С. Юношев и д.ф.-м.н. В. В. Сильвестров у стендовых докладов на конференции «Лаврентьевские чтения»

Fig. 7. Graduates of the department Ph.D. A. S. Yunoshev and Dr. of Science V. V. Silvestrov at poster presentations at the conference «Lavrentyev Readings»



Каждая дипломная работа на кафедре – маленькое научное исследование, выполняемое студентом самостоятельно. Для студента обязательно четкое понимание ответов на два вопроса: зачем выполняется эта работа и в чем заключается элемент новизны в работе. Безусловно, столь жесткие требования применимы далеко не к каждому студенту. Но практика подготовки специалистов показывает, что часть наших выпускников вполне способна после университета работать продуктивно и самостоятельно, и не только в сфере науки, но и в других областях человеческой деятельности.

Естественно, что будучи вовлеченными в работу над интересными научными проектами многие выпускники не расстаются с Институтом гидродинамики после окончания обучения, на кафедре высок уровень преемственности – ученик В. М. Титова В. В. Сильвестров сменил его на посту заведующего лабораторией высокоскоростных процессов, многие годы был заместителем зав. кафедрой, вел методическую и организационную работу, а сейчас лабораторию возглавляет уже его ученик, к.ф.-м.н. А. С. Юношев. Также выпускники кафедры возглавляют лаборатории динамики многофазных сред и кумуляции (А. Л. Куперштох), вихревых движений жидкости и газа (В. В. Никулин), динамических воздействий (В. В. Пай), физики взрыва (Э. Р. Прууэл), экспериментальной и прикладной гидродинамики (А. С. Бесов), и др.

Студенты кафедры принимают активное участие в работе научных семинаров отделов и лабораторий в базовом Институте, выступают на студенческих и «взрослых» научных конференциях и являются авторами и соавторами научных публикаций. Совет научной молодежи Института гидродинамики ежегодно проводит конкурс работ молодых ученых с отдельными номинациями для студентов бакалавриата и магистратуры.

Научные направления

Кафедра находится в постоянном поиске новых научно-технических направлений, в которых будут специализироваться ее выпускники, поддерживая при этом все исторически сформировавшиеся, остающиеся актуальными и востребованными.

Разрабатываются новые подходы к исследованию динамических процессов, основанные на применении уникальных исследовательских стендов СО РАН. Это развитие бесконтактных методик исследования взрывных процессов: применение синхротронного излучения и микроволн в миллиметровом диапазоне, лазерной диагностики газовых потоков. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов активировал сотрудничество с Институтом ядерной физики СО РАН, выпускник кафедры И. А. Рубцов стал координатором экспериментальной станции 1–3 ЦКП СКИФ.

По-прежнему актуальной остается тематика динамического воздействия на материалы, как в методическом, так и прикладном плане. Стоит упомянуть компактирование порошков и упрочнение металлов взрывом, сварку взрывом и создание новых, например, сверхтвердых материалов при помощи энергии взрыва. Весьма перспективным является использование техники детонационного нанесения защитных покрытий для решения множества прикладных задач.



Рис. 8. Проект необычного фонтана, реализованный Е. И. Пальчиковым и В. П. Чистяковым

Fig. 8. The project of an unusual fountain, implemented by E. I. Palchikov and V. P. Chistyakov

Значительное внимание продолжает уделяться вопросам преобразования энергии взрыва в электромагнитную энергию. Здесь и получение сверхсильных магнитных полей до 10 мегагаусс, и ускорение твердых тел до космических скоростей, и разрушение кумулятивных струй мощными импульсами тока.

Преподавателями кафедры ведутся активные работы по аналитическому исследованию магнитогидродинамических течений, по численному моделированию разнообразных динамических и взрывных процессов в конденсированных средах и газах, моделированию развития электрических разрядов и вулканических извержений.

В связи с появлением в Институте новых лабораторий, занимающихся прикладными задачами добычи углеводородов (нефтяной инжиниринг, технологии гидравлического разрыва пласта) вырос интерес к экспериментальной гидродинамике сред со сложной реологией.

Значительное место в исследованиях занимают вопросы, связанные с созданием так называемых детонационных двигателей, использующих энергию детонации, а не горения, взрывчатых газов. В данном режиме воздушно-космический корабль может использовать забортный кислород до высоты ~ 80 км и скорости 23 маха. А это новый класс летательных аппаратов на границе атмосфера-космос. Интересуют также классические вопросы перехода горения в детонацию и инициирования детонации горючих газовых и газокапельных смесей, что связано с необходимостью повышения безопасности при транспортировке больших объемов сжиженных газов, нефти и прочих продуктов.

В заключении процитируем академика В. М. Титова, многие годы возглавлявшего кафедру физики сплошных сред: «Перед будущими выпускниками кафедры лежат трудные дороги исследований в новой, во многом неизведанной, удивительной и неожиданной области науки и техники, где уровень энергетического воздействия на среду, временной масштаб протекающих процессов, их сложность бросают вызов интуиции и интеллекту молодого ученого».

Список литературы

1. **Титов В. М., Швецов Г. А.** Лабораторные методы высокоскоростного метания твердых тел взрывом // ФГВ. 1970. Т. 6, № 3. С. 401–404.
2. **Седых В. С., Дерибас А. А., Биченков Е. И., Тришин Ю. А.** Сварка взрывом // Сварочное производство. 1962. № 5. С. 3.
3. **Ханов А. М., Яковлев И. В.** Экспериментальное исследование параметров процесса сварки взрывом волокнистых композиционных материалов // ФГВ. 1982. Т. 18, № 2. С. 123–126.
4. **Гавриленко Т. П., Николаев Ю. А., Прохоров Е. С., Ульяницкий В. Ю.** О механизмах образования покрытий при газотермическом напылении // ФГВ. 1990. Т. 26. № 2. С. 110–123.
5. **Войцеховский Б. В.** О спиновой детонации // ДАН СССР. 1957. Т. 114. № 4. С. 717–720.

6. **Войцеховский Б. В., Котов Б. Е., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Оптические исследования поперечных детонационных волн // Изв. СО РАН СССР. Серия технических наук. 1958. № 9. С. 44.
7. **Солоухин Р. И., Топчиян М. Е.** Исследование шлейфа спиновой детонации // ДАН СССР. 1959. Т. 127. № 4. С. 602.
8. **Войцеховский Б. В., Войцеховский Б. Б.** Природа шаровой молнии // ДАН СССР. 1974. Т. 218. № 1. С. 77–80.
9. **Войцеховский Б. В., Войцеховский Б. Б.** Свечение в потоке заряженных капель // Письма в ЖЭТФ. 1976. Т. 23. № 1. С. 37–39.
10. **Лямкин А. И., Петров Е. А., Ершов А. П., Сакович Г. В., Ставер А. М., Титов В. М.** Получение алмазов из взрывчатых веществ // ДАН СССР. 1988. Т. 302. № 3. С. 611–613.
11. **Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А.** Выключение сильноточных цепей с помощью взрывчатых веществ // ФГВ. 1973. Т. 9. № 3. С. 453–455.
12. **Зубков П. И., Лукьянчиков Л. А., Тен К.** О гашении электрической дуги с помощью взрывчатых веществ // ПМТФ. 1978. Т. 19. № 4. С. 40–46.
13. **Биченков Е. И., Полюдов В. В., Рабинович Р., Титов В. М.** Импульсный аппарат жесткого рентгеновского излучения // Приборы и техника эксперимента. 1974. № 3. С. 208.
14. **Алтухов А. А., Биченков Е. И., Гусев Е. А., Пальчиков Е. И., Овсянников В. Л.** Сильноточный импульсный рентгеновский аппарат для динамической радиографии // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 1. С. 189.
15. **Пинаков В. И., Рычков В. Н., Топчиян М. Е.** Возможности моделирования гиперзвуковых потоков на газодинамических установках адиабатического сжатия с высоким давлением // ПМТФ. 1982. Т. 23. № 1. С. 63–69.
16. **Быковский Ф. А., Митрофанов В. В.** Детонационное сжигание газовой смеси в цилиндрической камере // ФГВ. 1980. Т. 16. № 5. С. 107–117.
17. **Васильев А. А., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е.** Детонационные волны в газах // ФГВ. 1987. Т. 23. № 5. С. 109–131.
18. **Войцеховский Б. В., Истомин В. Л., Митрофанов В. В.** Использование импульсных высокоскоростных плоских струй жидкости для измельчения отработавших сборок ТВЭЛов АЭС // Атомная энергия. 1994. Т. 68. № 6. С. 443.
19. **Биченков Е. И., Швецов Г. А.** Мегагауссные магнитные поля. Физика. Техника. Применения // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 4. С. 90–102.
20. **Фёдоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В., Швецов Г. А., Матросов А. Д.** О возможностях управления кумулятивным эффектом взрыва с помощью электромагнитных воздействий // ФГВ. 2000. Т. 36. № 6. С. 126–145.
21. **Ахметов Д. Г., Луговцов Б. А., Тарасов В. Ф.** Тушение пожаров на газонефтяных скважинах с помощью вихревых колец // ФГВ. 1980. Т. 16. № 5. С. 8–14.
22. **Войцеховский Б. В., Истомин В. Л.** Динамическая антикумулятивная защита // ФГВ. 2000. Т. 36. № 6. С. 87–90.

Сведения об авторах

Пальчиков Евгений Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики сплошных сред, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия), Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева (Новосибирск, Россия)

Котельникова Мария Станиславовна, кандидат физико-математических наук, доцент, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия), Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

Evgeniy I. Palchikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Continuum Physics, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

Maria S. Kotelnikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 19.01.2021;
одобрена после рецензирования 26.05.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 19.01.2021;
approved after reviewing 26.05.2022; accepted for publication 22.06.2022*

Учебно-методическая статья
УДК 372.853; 53.05
DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-93-104

**Лекционные демонстрации по физике
Новосибирского государственного университета**
**Евгений Иванович Пальчиков¹, Валерий Алексеевич Селезнёв²,
Евгений Геннадьевич Алексеев³**

¹⁻³Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
Новосибирск, Россия

¹e.palchikov@g.nsu.ru; ²seleznev@phys.nsu.ru

³webmaster@phys.nsu.ru

Аннотация

Статья рассказывает о 60-летней истории создания набора базовых лекционных демонстраций на физическом факультете Новосибирского Государственного университета и подразделения его поддерживающего – с момента возникновения университета. Рассматривается эволюция набора демонстрационных установок, методических описаний и методик использования оборудования в процессе преподавания физики в различных ситуациях. Рассказывается о людях, внесших большой вклад на разных стадиях преобразования ДКФ – демонстрационного кабинета по физике и МЛДКС – межфакультетской лаборатории демонстраций и компьютерного сопровождения. Приводятся библиографические ссылки на каталоги с методическими описаниями лекционных демонстраций, разработанных и созданных в НГУ.

Ключевые слова

лекционные демонстрации, эксперимент, экспериментальные задачи, демонстрационные установки, физические опыты

Для цитирования

Пальчиков Е. И., Селезнёв В. А., Алексеев Е. Г. Лекционные демонстрации по физике Новосибирского государственного университета // Сибирский физический журнал. 2022. Т. 17, № 2. С. 93–104. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-93-104

**Lecture demonstrations of experiments in physics
at the Novosibirsk State University**

**Evgeniy I. Palchikov¹, Valery A. Seleznev²,
Evgeniy G. Alekseev³**

¹⁻³Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

¹Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

¹e.palchikov@g.nsu.ru; ²seleznev@phys.nsu.ru

³webmaster@phys.nsu.ru

Abstract

The article tells about the 60-year history of the creation of a set of basic lecture demonstrations at the Physical Department of the Novosibirsk State University and about the subdivision for demonstrations support – from the moment the university was founded. The evolution of a set of demonstration installations, methodological descriptions and techniques for using equipment in the process of teaching physics in various situations is considered. It tells about the people who made a great contribution at different stages of the transformation of DKF – a demonstration room in

physics and MLDKS – an interfaculty laboratory of demonstrations and computer support. Bibliographic references to catalogs with methodological descriptions of lecture demonstrations developed and created at NSU are given.

Keywords

demonstrations at the lectures, experiment, experimental problems, demonstration setups, physical experiments

For citation

Palchikov E. I., Seleznev V. A., Alekseev E. G. Lecture demonstrations of experiments in physics at the Novosibirsk State University. *Siberian Journal of Physics*, 2022, vol. 17, no. 2, pp. 93–104. DOI 10.25205/2541-9447-2022-17-2-93-104

Роль демонстраций в учебном процессе

Как известно, первой сигнальной системой – зрение, слух, осязание, обоняние – человек обладает с рождения. Возможно поэтому наибольшее впечатление на студентов и школьников производят не уравнения и математические модели явлений, а конкретные физические эксперименты. Именно они легче доступны к восприятию и запоминаются всем студентам в процессе обучения. По-видимому, классиком физических демонстрационных опытов стоит считать Роберта Вихарда Поля, преподававшего лекции по физике в Геттингенском университете с помощью демонстраций. Три его монографии, переведённые на русский язык [1–3], до сих пор являются настольными книгами и своего рода энциклопедиями для лекторов, желающих улучшить свой курс лекций показом экспериментов.

Структурное подразделение ДКФ–МЛДКС НГУ

В НГУ, для сопровождения лекций физическими демонстрациями, со времени его основания был создан ДКФ – демонстрационный кабинет по физике, позже переименованный в МЛДКС – межфакультетскую лабораторию демонстраций и компьютерного сопровождения. Межфакультетскую – так как лекции с показом экспериментальных демонстраций читаются для всех факультетов НГУ. ДКФ–МЛДКС состоит из пяти модулей, разделённых на три зала, примыкающих к большой физической аудитории им. Г. И. Будкера (БФА) и имеющие в БФА отдельный вход.

В залах, в шкафах с прозрачными полками, находится на хранении оборудование, предназначенное для демонстраций. Для лекторов имеются каталоги, описания демонстраций и методические указания по их применению. В различное время, в разные периоды, в самой аудитории было смонтировано самое современное на данный период оборудование для сопровождения лекций. Кабинки и система для синхронного перевода, стереопроектор Carl Zeiss Jena с поляризационным разделением каналов, отечественный проекционный телевизор на электростатических масляных пленках в вакууме с дуговым освещением, профессиональные мощные диа- и эпипроекторы на большой экран, крейты КАМАК с дисплеями, оверхед проекторы, мультимедиа проекторы на жидких кристаллах LCD и на массивах управляемых зеркал DLP, документ-камеры, большие телевизионные мониторы дублирующие центральный экран, акустические системы разных поколений с проводными и радиомикрофонами, профессиональные телевизионные камеры и вебкамеры, записывающая и управляющая аппаратура.

В настоящее время управление мультимедиа в БФА осуществляется с пультовой, находящейся в МЛДКС рядом с БФА. В этом же помещении находится сервер физического факультета: www.phys.nsu.ru. Под амфитеатром большой аудитории находится склад массивных и редко показываемых экспонатов, которые можно оперативно вынести или выкатить на тележке в аудиторию. ДКФ и МЛДКС являются структурным подразделением кафедры общей физики (КОФ) физического факультета НГУ.

Основными задачами МЛДКС являются:

– подготовка и проведение физических и компьютерных лекционных демонстраций по заявкам преподавателей во время чтения курсов в большой физической аудитории им. Будкера Г.И. (БФА);

- обеспечение лекционных курсов и других мероприятий, проводимых в БФА компьютерной, проекционной и звукоусиливающей аппаратурой;
- создание аппаратных и программных средств для компьютерных лекционных демонстраций и автоматизированных лабораторных работ в практикумах КОФ;
- технический контроль и регламентные работы для поддержания в рабочем состоянии оборудования БФА;
- обеспечение плановых учебных занятий в практикумах кафедры с использованием компьютеров;
- техническая и методическая поддержка сотрудников кафедры общей физики по созданию новых лекционных демонстраций и лабораторных работ с использованием компьютерной техники;
- обеспечение для преподавателей кафедры возможности иметь свои базы учебных материалов в электронном виде;
- разработка новых и совершенствование существующих лекционных демонстраций и задач;
- ведение и постоянное обновление каталога имеющихся в лаборатории демонстраций;
- поддержание демонстраций в рабочем состоянии;
- консультирование преподавателей по вопросам лекционных демонстраций.

Кто влиял на процесс

Чтобы понять динамику изменения набора демонстраций и работы ДКФ в разное время необходимо знать, кто руководил в это время кафедрой общей физики и физическим факультетом.

Заведующими кафедрой общей физики в разное время были: Г. И. Будкер (1959–1966 гг.), Р. И. Солоухин (1966–1972 гг.), Г. И. Димов (1972–1976 гг.), М. Е. Топчиян (1976–1984 гг.), И. Н. Мешков (1984–1987 гг.), В. Г. Дудников (1987–1990 гг.), Б. А. Князев (1990–2000 гг.), А. М. Оришич (2000–2011 гг.), А. Г. Погосов (с 2011 по настоящее время).

А деканами физического факультета были: Р. И. Солоухин (1961 г.), Р. З. Сагдеев (1962 г.), В. Н. Байер (1962–1968 гг.), В. М. Титов (1968–1978 гг.), В. С. Соколов (1972–1975 гг.), Л. М. Барков (1975–1978 гг.), С. Г. Раутиан (1978–1983 гг.), Н. С. Диканский (1983–1993 гг.), В. С. Фадин (1993–1998 гг.), И. А. Котельников (1998–2001 гг.), А. В. Аржанников (2001–2010 гг.), А. Е. Бондарь (2010–2020 гг.), В. Е. Блинов (с 2020 по настоящее время).

*a**б**в*

Рис. 1. *a* – М. А. Лаврентьев; *б* – В. Ф. Минин; *в* – Р. И. Солоухин

Fig. 1. Founders of the NSU Subdivision for the Demonstration of Experimental Physics:

a – M. A. Lavrentyev; *b* – V. F. Minin; *c* – R. I. Soloukhin

Начало

Вот что вспоминает Минин Владилен Федорович, выпускник Московского физико-технического института, доктор технических наук, организатор и первый директор Института прикладной физики, доцент кафедры общей физики ФФ НГУ (1959–1969):

«Создание университета являлось одним из наиболее важных составляющих Сибирского отделения Академии наук Советского Союза. Этому придавал важнейшее значение Михаил Алексеевич Лаврентьев, видимо. И по этой причине Михаил Алексеевич попросил меня помочь в вопросе создания демонстрационного кабинета НГУ.

Как известно, большую роль в создании университета сыграл Рем Иванович Солоухин. Наши лаборатории в Институте гидродинамики были рядом, мы вели некоторые совместные исследования. Очень много наших дискуссий было посвящено будущим молодым ученым, процессу их обучения и особенно выпуску из университета физиков-экспериментаторов. Нам казалось, что без хороших лекционных демонстраций, хорошего физического практикума, облегчающих понятие физической сущности тех или других явлений, невозможно иметь глубокие познания в физике и что именно лекционные демонстрации привлекут к научной работе талантливых физиков-экспериментаторов.

Прежде всего, на работу были приняты два механика – Гудзь Григорий Гаврилович и Копытин Николай Дмитриевич. С помощью такой малой «команды» и началось оборудование Большой физической аудитории. Большое внимание уделялось созданию механических мастерских как основы разработки новых работ на физическом практикуме и созданию новых лекционных демонстраций по курсу общей физики. Многие демонстрации использовали авиационное оборудование, которое мы доставали на военных аэродромах, использовалось старое оборудование институтов, оборудование радиолокационных станций. С самого начала были изготовлены демонстрационные подвижные столы, источники питания, и на основе самолетных рулевых машинок изготовлено и запущено автоматизированное затемнение окон, которое было крайне необходимо для лекционных демонстраций.

Большая физическая аудитория была оборудована кабинами для синхронного перевода лекций иностранных ученых и часто использовалась для проведения семинаров и конференций по самым различным направлениям. Интенсивно изготавливались в мастерских приборы и лекционные демонстрации по курсу физики, которые в то время читали академик Будкер, профессор Солоухин, профессор Чириков. Чтобы лучше понять роль и необходимость новых демонстраций, пришлось прочитать и мне общий курс физики на вечернем отделении.

Мне требовался помощник, который мог бы самостоятельно заниматься созданием новых демонстраций и руководить повседневной работой по организации демонстрационного процесса.

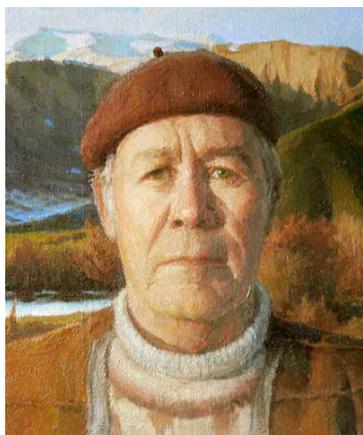


Рис. 2. Ф. Х. Байбулатов

Fig. 2. F. N. Baibulatov

Однажды, во время вступительного экзамена, мне попался молодой человек восточной национальности, при разговоре с которым выяснилось, что он радиолобитель, механик, может ремонтировать часы и увлечен физикой (см. рис. 2). Приехал он из Чирчика и хочет учиться в НГУ. Он блестяще сдал экзамен по физике и понравился мне. Я подумал, почему бы ему не учиться на вечернем факультете и одновременно работать в демонстрационном кабинете? Я предложил ему учебу на вечернем факультете и работу на кафедре общей физики, на что он с радостью согласился. Таким образом, с приходом Байбулатова Филарета Хакимовича мной был полностью сформирован коллектив демонстрационного кабинета, и весь наш дружный коллектив, в основном, и создал основную массу всех лекционных демонстраций по курсу общей физики.

Всего за короткий период нами было создано более 150 демонстрационных работ по следующим основным разделам физики: основы техники измерений, электроника, магнетизм, электродинамика, молекулярная физика. Многие из этих работ были уникальными и создали фундамент для практического обучения студентов НГУ многих поколений. Многие приборы и демонстрации по физике до сих пор используются в учебном процессе НГУ.

О качестве созданных демонстрационных работ говорит и следующий случай. В то время мы установили связи с демонстрационным кабинетом кафедры общей физики МГУ, и посещение их делегацией нашего демонстрационного кабинета с целью помощи нам вызвало неподдельное изумление нашей работой, качеством демонстраций и их уровнем. Они заявили, что мы не нуждаемся в их помощи и что многие наши демонстрации не имеют аналогов в МГУ.

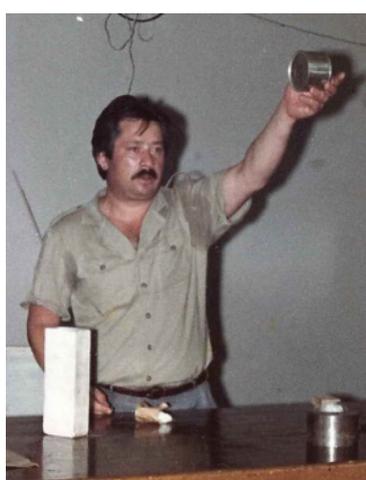
К сожалению, мне пришлось покинуть НГУ в связи с перегрузкой по основной работе в 1969 году, но дни, связанные с созданием новых лекционных демонстраций, я вспоминаю с большим удовольствием».

Если посмотреть на некоторые описания демонстраций НГУ, которые публиковались в журнале «Успехи физических наук» Ф. Х. Байбулатовым в раннее время (1964–1970 гг.) [4–8], то заметно влияние научных тем, которыми тогда занимались Р. И. Солоухин и В. Ф. Минин. И эти демонстрации действительно сильно отличаются от классических демонстраций МГУ [9]. С 1970 до 1978 года заметно влияние на тематику демонстраций И. Н. Мешкова с тематикой ИЯФ. Например, полноразмерная искровая камера размером с большой холодильник. Тем не менее, значительная часть демонстраций была посвящена классическим разделам физики: механика (37 демонстраций), механика жидкостей и газов (11), электричество (50) колебания и волны (12) молекулярная физика (14), оптика (25). Описание этих демонстраций отражено в каталоге 1978 года [10]. В этот же период (до 1978 года) в ДКФ появился Рафик Джауддатович Гайнутдинов (рис. 3), который далее в течение длительного периода обеспечивал функционирование ДКФ.

Будучи студентом ФФ НГУ на первом курсе, в 1967 году, мне действительно было интересно наблюдать, как из двери в БФА справа выходит блондинка с винтовкой (Т. П. Романенкова, см. рис. 3). Ставит мешок с песком на «химическую» фарфоровую раковину слева от доски, заполняет пластмассовое карболитовое ведёрко водой и тоже ставит на край раковины перед мешком. Затем отходит подальше в проход аудитории слева и стреляет. Ведро разлетается от гидроудара. Сейчас такой опыт с винтовкой, в аудитории, где больше сотни человек, трудно представить.



а



б

Рис. 3. а – Т. П. Романенкова; б – Р. Д. Гайнутдинов
Fig. 3. а – Т. P. Romanenkova; б – R. D. Gainutdinov

Длительное время, до конца 70-х годов, методические описания демонстраций содержались в виде карточек в картотеках (рис. 4). Карточек было около 200 и более.

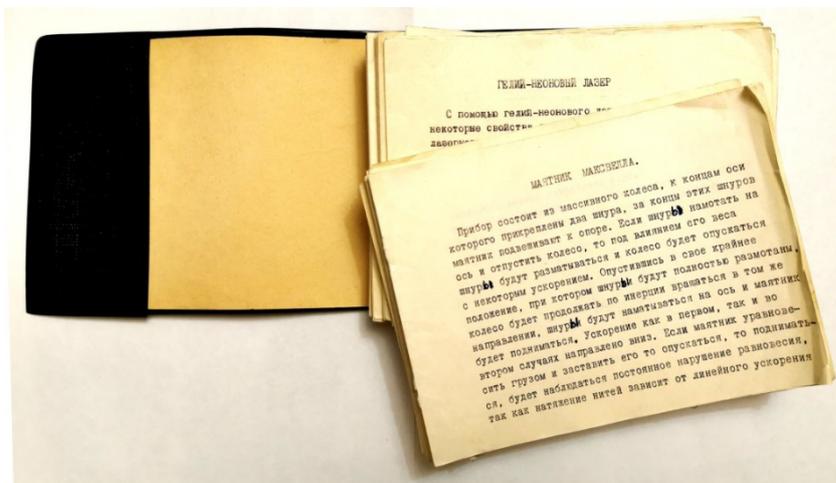


Рис. 4. Картотека с описанием демонстраций. Применялась до 1977 года
Fig. 4. Card file with the description of demonstrations. Used until 1977

В основном это было связано со сложностью оформления ротاپринтных заказов и более простым процессом напечатания новых карточек по мере появления новых демонстраций.

Первая модернизация

Под руководством И. Н. Мешкова (рис. 5) в процессе чтения лекционных курсов «Электромагнитное поле», «Электричество и оптика», «Электродинамика» и в должности завкафедрой до 1978 года была проведена революция в демонстрациях по электромагнетизму и оптике. Была переделана вся электронная начинка БФА под компьютеры PDP (Электроника–60 + КАМАК + ДВК), всё оборудование было врезано в столы и стены. Впервые был выпущен ротاپринтный каталог в виде книжки с описанием 149 демонстраций [10]. Были расширены разделы демонстраций по электромагнетизму и оптике [11;12].

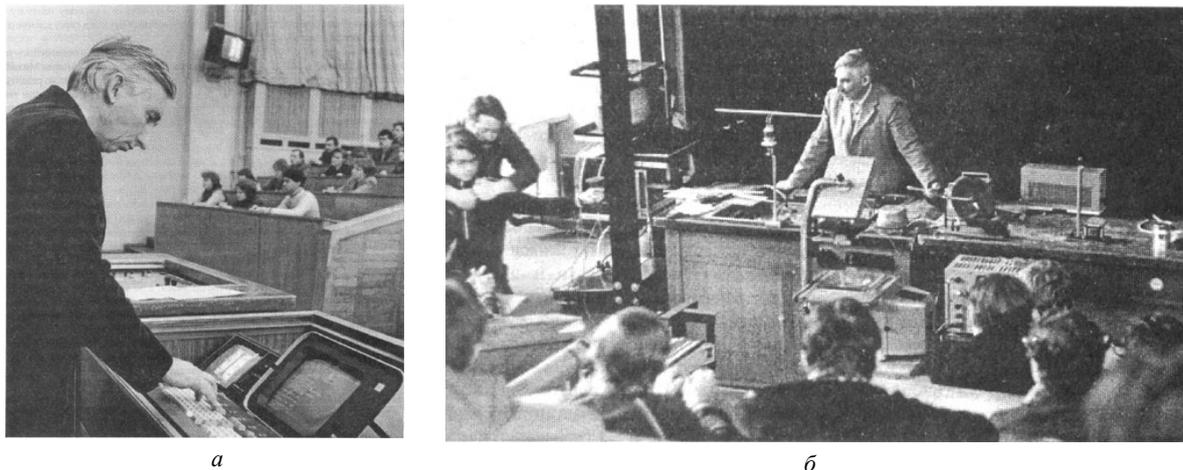


Рис. 5. а – И. Н. Мешков в модернизированном ДКФ/БФА; б – Р. Д. Гайнутдинов (на снимке – слева) ассистирует И. Н. Мешкову в эксперименте

Fig. 5. a – I. N. Meshkov in modernized NSU subdivision for the demonstration; b – R. D. Gainutdinov (in the picture – on the left) assists I. N. Meshkov in the experiment



Рис. 6. ЛФМШ: *а* – опыты с жидким азотом; *б* – султан от подводного взрыва высотой 8 м
 Fig. 6. Summer Physics and Mathematics School: *a* – experiments with liquid nitrogen; *b* – sultan from an underwater explosion 8 m high

К началу 90-х годов в ДКФ имелось более 200 физических и компьютерных демонстраций по всем разделам физики. Большинство из них были созданы силами сотрудников лаборатории и преподавателей кафедры, некоторые установки были переданы из институтов СО РАН. Существенная часть их носила классический характер и относилась к определенному разделу физики, часть была представлена в виде задач-демонстраций, другая часть была связана с тематикой работы научно-исследовательских институтов СО РАН.

С 1976 года по настоящее время – 45 лет, не пропуская ни одного года, в августе – проводятся лекции-демонстрации-шоу – для летних физматшкольников (ЛФМШ). Эти лекции состоят из эффектных, запоминающихся физических опытов, цель которых – заинтересовать детей в занятии физикой (см. рис. 6).

Лекции приобрели популярность не только в НГУ, ФМШ и Академгородке, но многие из них, в виде записей фрагментов или полностью, появились в YouTube [13].

В НГУ во всех вариантах вступительных экзаменов на физический факультет более 40 лет использовались задачи-демонстрации [14]. Они были оформлены в виде показа загадочного физического эксперимента, и предложения объяснить его, построив физическую модель явления (в рамках школьной программы). Наряду с задачами-оценками это позволило более надежно отбирать потенциальных экспериментаторов, которых в научных исследованиях необходимо иметь в большем количестве, чем теоретиков.

С 1989 года по настоящее время на физическом факультете НГУ в курсе лекций «Введение в технику физического эксперимента» (ВТФЭ) показываются экспериментальные задачи-демонстрации. Задача показывается в конце каждой лекции и выглядит как совсем необъяснимое с точки зрения современной науки явление, например: сверхпроводник при комнатной температуре, «биополе», видимое невооруженным глазом между пальцами рук, и т. д. На следующей лекции желающие могут на листочке сдать объяснение – физическую модель показанного явления. Решение этих задач является необязательным, но набрав определенное количество баллов, можно получить автоматический зачет по курсу ВТФЭ. Смысл этих задач заключается в адаптации будущих ученых к необъяснимым результатам реального эксперимента и пре-

одолении психологического барьера при их решении, умению ставить собственные дополнительные эксперименты, разбивать задачу на решаемые блоки, нахождению и выбору из ряда теоретических моделей явления, наиболее значимых для данного случая. Реально каждый экспериментатор и теоретик столкнется с такими ситуациями в будущих исследованиях. Таких задач в курсе разработано более 50. Во многом эти задачи перекликаются с ранними задачами автора [15], более сложными, чем предлагались на вступительных экзаменах, и в чем-то перекликаются с задачами-мини-исследованиями Дж. Уокера [16].

Капитальный ремонт и вторая модернизация

В 1997 году ДКФ меняет название на ЛДКС, а на должность зав. ЛДКС был назначен Гусельников В. И., сотрудниками стали Селезнев В. А., Фуфачев Ю. Г. и Нестеренко В. И., куратором ЛДКС стал Клишкин В. Ф.

Все время своего существования основной аудиторией в НГУ и на ФФ для проведения демонстраций физических экспериментов и поточных занятий являлась БФА им. Г. И. Будкера. В 1998 году по инициативе сотрудников лаборатории (Гусельникова В. И. и Селезнева В. А.) при активной поддержке ректората НГУ в аудитории был проведен первый капитальный ремонт. В качестве спонсора выступил ИЯФ СО РАН. Было закуплено новое звукотехническое оборудование, сделано новое электрифицированное зашторивание, большой моторизованный экран с повышенной отражающей способностью, оверхед-проекторы и первый мультимедиа-проектор (на то время достаточно редкий и дорогой прибор).

В 1998 г. заведующим ЛДКС становится Селезнев В. А. (рис. 7). Совместно с ведущим лектором по курсу «Введение в технику физического эксперимента» (ВТФЭ) проф. КОФ Пальчиковым Е. И. была проведена инвентаризация оставшегося оборудования, сделана систематизация его и намечены планы по дальнейшему развитию лаборатории. Активное участие в ремонте и изготовлении недостающих демонстраций в то время принимали новые сотрудники лаборатории оптик-механик Нестеренко В. И. и рабочий высокой квалификации Фуфачев Ю. Г.



Рис. 7. В. А. Селезнёв, Е. И. Пальчиков. Тушение газового фонтана кольцевым вихрем
Fig. 7. V. A. Seleznev, E. I. Palchikov. Extinguishing a gas fountain by means of ring vortex

В начале 2000 г. под руководством д.ф.-м.н. профессора КОФ Клишкина В. Ф. сотрудниками лаборатории были разработаны комплексы компьютерных лекционных демонстраций по волновой оптике, механике, молекулярной физике [17–19]. «Автоматизированный комплекс лекционных демонстраций с компьютерной поддержкой» в 2006 г. получил Золотую медаль

и диплом в рамках проводимого конкурса учебного оборудования на Сибирской ярмарке «УЧ-СИБ-2006». По итогам этой ярмарки четыре комплекса приобрел Томский политехнический университет.

Третья модернизация

В начале 2000-х годов мастерские НГУ сначала были перемещены в ВКИ на дистанцию 5 км от НГУ, а затем реально исчезли. Поэтому следующий этап в развитии лаборатории был связан с поиском и приобретением демонстрационного оборудования у отечественных и зарубежных исполнителей.

Из отечественных производителей у «РОСУЧПРИБОР» была закуплена в 2006 г. небольшая партия из 12 наименований. Качество демонстраций оказалось не на высоте. Пришлось дорабатывать на месте, а некоторые вскоре и вовсе сломались. Стало ясно, что нужно искать поставщика с надёжной репутацией и широким набором компонентов.

Под руководством, ставшего к тому времени куратором МЛДКС, проф. Пальчикова Е. И., был проведён анализ имеющегося в ЛДКС оборудования и его состояния. Далее, по каталогу фирмы RHYWE, был сформирован заказ на новое оборудование. Составлен список из 700 наименований на 13,6 млн руб. По итогам выигранного НГУ Всероссийского конкурса инновационных образовательных программ, проходящего в рамках национального проекта «Образование», в Германии (г. Геттинген, фирма RHYWE) [20] было закуплено из данного списка, и в 2007 году получено новое оборудование – 73 комплекта приборов по всем разделам физики – более 450 предметов на сумму 5,3 млн руб. Это существенно дополнило имеющийся набор демонстраций. Реально каждый комплект состоит из набора деталей – своего рода конструктора, позволяющего показывать на нём разные экспериментальные демонстрации.

Далее, под руководством Пальчикова Е. И. была проведена работа по запуску и внедрению в учебный процесс данного оборудования. Была также опубликована статья с описанием концепции применения экспериментальных задач в обучении физики [21] и написаны методические пособия к демонстрациям по механике [22; 23].

В 2012–2013 гг. в рамках программы ТОП–100 коллективом МЛДКС было снято 10 учебных фильмов, с электронным учебно-методическим сопровождением [24–33]. Были проведены видеосъёмки 20 экспериментальных задач-демонстраций [24; 25], снято восемь методических фильмов с лекционными демонстрациями [26–33]. В то время съёмка задач казалась не так нужна, однако они оказались востребованными в 2019 году. Во время локдауна из-за ковида, при дистанционном чтении лекций «Введение в технику физического эксперимента», нас выручили записанные ранее задачи с хорошо отрежиссированными и красиво поставленными экспериментами.

В 2013 году под руководством доцента Синицкого С. Л., потокового лектора на 2 курсе ФФ НГУ, были разработаны новые демонстрации по электродинамике, оптике и выпущены их методические описания [34–36].

В 2016 г. была проведена еще одна закупка демонстрационного оборудования. На этот раз у немецкой фирмы 3V Scientific [37]. Всего 57 позиций комплектов практически по всем разделам физики. Выбор был сделан на основе опыта работы с аналогичным оборудованием и по рекомендациям куратора МЛДКС и ведущих лекторов. В 2020 г. был проведен второй капитальный ремонт БФА им. Г. И. Будкера – со сменой амфитеатра, пола, потолка, созданием звукопоглощающих стен из современных материалов, заменой всей слаботочной и силовой аппаратуры, встроенной в аудиторию и выведенной на пультовую в соседнем помещении.

Несмотря на то, что письменного и устного экзамена на ФФ НГУ сейчас нет, существуют олимпиады «Будущее Сибири», «Твой путь в настоящую науку», в которых задачи составляются в НГУ коллективом под руководством завкафедрой общей физики проф. А. Г. Погосова

[38]. В них всегда присутствуют экспериментальные задачи, которые изготавливаются и мультимедийно записываются на базе МЛДКС.

Заключение

ДКФ и МЛДКС развивается, меняется вместе с изменением приборов и методов, тенденциями экспериментальной физики, людьми и успешно решает возложенные на него задачи. НГУ, как относительно молодой ВУЗ, находится на переднем крае демонстрационных методик физического эксперимента. В первую очередь этому способствует нахождение НГУ в Академгородке, среди исследовательских институтов РАН. А также то, что значительное число преподавателей является сотрудниками академических институтов и совмещают исследовательскую работу с преподаванием.

Список литературы

1. **Поль Р. В.** Учение об электричестве. Пер. с нем., М. : ГИФМЛ. 1962 г., 516 с.
2. **Поль Р. В.** Оптика и атомная физика. Пер. с нем., М. : Наука. 1966 г., 450 с.
3. **Поль Р. В.** Механика, акустика и учение о теплоте. Пер. с нем. М. : Наука. 1971 г., 480 с.
4. **Байбулатов Ф. Х.** Демонстрация эффекта Доплера в акустике. УФН. 1964. Т. 84. С. 729–730. DOI 10.3367/UFNr.0084.196412j.0729.
5. **Байбулатов Ф. Х.** Демонстрация по деионизации ртутной плазмы. УФН. 1966. Июнь. Т. 89. Вып. 2. С. 305–306. DOI 10.3367/UFNr.0089.196606f.0305.
6. **Байбулатов Ф. Х.** Лекционные демонстрации с импульсными магнитными полями. УФН. 1967. Т. 92. С. 347–350. DOI 10.3367/UFNr.0092.196706i.0347.
7. **Байбулатов Ф. Х.** Несколько демонстраций по эффекту Доплера и интерференции в сантиметровом радиодиапазоне. УФН 1968. Т. 96. С. 370–374. DOI 10.3367/UFNr.0096.196810g.0370.
8. **Байбулатов Ф. Х.** Учебная установка для СВЧ диагностики плазмы. УФН. 1970. Июнь. Т. 101. Вып. 2. С. 331–334. DOI 10.3367/UFNr.0101.197006f.0331.
9. **Лекционные демонстрации по физике** / М. А. Грабовский, А. Б. Млодзеевский, Р. В. Телеснин и др.; Под ред. В. И. Ивероновой. – М. : Наука. 1965. – 572 с.
10. **Лекционные демонстрации по физике.** Список лекционных демонстраций по курсу общей физики : Методическая разработка / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Новосиб. гос. ун-т им. Ленин. комсомола; [сост. : Мешков И. Н., Гайнутдинов Р. Д., Попова Т. П., Дегтярев В. С.] Новосибирск : Новосибирский Государственный университет. 1978. – 29 с.
11. **Лекционные демонстрации по физике.** Квазистационарное электромагнитное поле: Методические указания / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Новосиб. гос. ун-т им. Ленин. комсомола; [сост. : Брагин О. А., Гайнутдинов Р. Д., Мешков И. Н., Смирных Л. Н., Филиппова Л. Г.] Новосибирск : Редакционно-издательский отдел НГУ. 1985. – 24 с.
12. **Лекционные демонстрации по физике.** Электромагнитные волны и оптика: Методические указания / М-во высш. и сред. спец. образования РСФСР, Новосиб. гос. ун-т им. Ленин. комсомола; [сост. : Гайнутдинов Р. Д., Мешков И. Н., Смирных Л. Н., Филиппова Л. Г.] Новосибирск : Редакционно-издательский отдел НГУ. 1986. – 13 с.
13. **Занимательная физика.** Лекция в ЛФМШ. 2006. Режим доступа : <http://www.youtube.com/watch?v=REqX6SjxGP8>.
14. **Меледин Г. В.** Физика в задачах: экзаменационные задачи с решениями. 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 272 с.
15. **Пальчиков Е. И.** Какого цвета зеленка? Квант. – 1978. – № 7. С. 27.

16. **Уокер Дж.** Физический фейерверк: – 2-е изд. Пер. с англ. / Под ред. И. Ш. Слободецкого. – М. : Мир, 1988. – 298 с.
17. **Jearl Walker.** The Flying Circus of Physics, John Wiley and sons, Inc. 1975. 331 p.
18. **Климкин В. Ф., Селезнёв В. А., Торопецкий К. В.** Термодинамика и молекулярная физика: Лекционные демонстрации. НГУ, ЛДКС. Новосибирск. 2005. – 64 с.
19. **Климкин В. Ф., Селезнёв В. А., Потькалов А. С.** Двухлучевая интерференция света. Опыт Юнга: Лекционная демонстрация. НГУ, ЛДКС. Новосибирск. 2007. – 34 с.
20. **Климкин В. Ф., Селезнёв В. А., Потькалов А. С.** Лекционные демонстрации по интерференции света: Учебное пособие. НГУ, ЛДКС. Новосибирск. 2009. – 55 с.
21. RHYWE Systeme GmbH & Co. KG. Robert-Bosch-Breite 10. 37079 Göttingen. Germany, 2007.
22. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Использование экспериментальных задач в преподавании физики. Физическое образование в ВУЗах. Том 20. № 4. 2014. – С. 154–159.
23. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Лекционные демонстрации по механике: Учебное пособие. Физический факультет, КОФ, МЛДКС. НГУ. Новосибирск. 2010. – 61 с.
24. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Лекционные демонстрации по механике: Учебное пособие. Часть 2. Физический факультет, КОФ, МЛДКС. НГУ. Новосибирск. 2011. – 64 с.
25. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Сборник видеозадач по физике. Ч.1. 10 экспериментальных задач-демонстраций. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2012.
26. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Сборник видеозадач по физике. Ч.2. 10 экспериментальных задач-демонстраций. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2012.
27. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Демонстрационные методики в преподавании физики. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2012.
28. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Жидкий азот. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2012.
29. **Погосов А. Г., Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Демонстрационные задачи по физике. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2012.
30. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Виды разрядов (искровой, дуговой, коронный, тлеющий, высокочастотный). Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2013.
31. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Емкостные и индуктивные накопители энергии. Давление магнитного поля. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2013.
32. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Трансформаторы – генераторы высоковольтных импульсов. Трансформатор Тесла. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2013.
33. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Трансформаторы – генераторы высоковольтных импульсов. Катушка Румкорфа. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2013.
34. **Пальчиков Е. И., Селезнев В. А., Алексеев Е. Г.** Источники высоких статических напряжений. Фильм. МЛДКС НГУ. Новосибирск. 2013.
35. **Синицкий С. Л.** Электродинамика и оптика [Текст: электронный ресурс] : лекционные демонстрации : [для студентов 2 курса физического факультета НГУ] : в 3 ч. / С. Л. Синицкий, В. А. Селезнев ; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. общей физики, Межфак. лаб. демонстраций и компьютер. Сопровождения. – (Новосибирск : НБ НГУ, 2013) – Ч. 1 – Электрон. дан. (1 файл) – Библиогр. : с. 62 (18 назв.) – Текст. – Режим доступа : <https://e-lib.nsu.ru/dsweb/ApplySimpleSearch#Resource-1251>.
36. **Синицкий С. Л.** Электродинамика и оптика [Текст : электронный ресурс] : лекционные демонстрации : [для студентов 2 курса физического факультета НГУ] : в 3 ч. / С. Л. Синицкий, В. А. Селезнев ; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. общей физики, Межфак. лаб. демонстраций и компьютер. сопровождения. – (Новосибирск : НБ

- НГУ, 2013). – Ч. 2. – Электрон. дан. (1 файл). – Библиогр. : с. 59 (18 назв.) . – Текст. – Режим доступа : <https://e-lib.nsu.ru/dsweb/ApplySimpleSearch#Resource-1252>.
37. **Синицкий С. Л.** Электродинамика и оптика [Текст: электронный ресурс] : лекционные демонстрации : [для студентов 2 курса физического факультета НГУ] : в 3 ч. / С.Л. Синицкий, В.А. Селезнев ; М-во образования и науки РФ, Новосиб. гос. ун-т, Физ. фак., Каф. общей физики, Межфак. лаб. демонстраций и компьютер. сопровождения. – (Новосибирск : НБ НГУ, 2013). – Ч. 3. – Электрон. дан. (1 файл). – Библиогр.: с. 65 (18 назв.). – Текст. – Режим доступа : <https://e-lib.nsu.ru/dsweb/ApplySimpleSearch#Resource-1253>.
38. Международная группа компаний 3B Scientific (3B Сайнтифик). Режим доступа : <https://www.3bscientific.ru/3b-scientific,ср.html>.
39. **Погосов А. Г.** Варианты задач по физике, предлагавшиеся на олимпиаде школьников «Будущее Сибири» и на вступительных экзаменах в НГУ в 2009–2015 гг. (с решениями): Учеб.-метод. пособие. / Сост.: Погосов А. Г., Махмудиан М. М., Пальчиков Е. И. и др.; Новосиб. Гос. Ун-т. – Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2017. – 189 с.

Сведения об авторах

- Пальчиков Евгений Иванович**, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; профессор, заведующий кафедрой физики сплошных сред (ФСС), Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)
- Селезнев Валерий Алексеевич**, доцент, заведующий лабораторией МЛДКС кафедры общей физики физического факультета, ведущий инженер по метрологии отдела аэрокосмических исследований, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)
- Алексеев Евгений Геннадьевич**, преподаватель, ведущий инженер МЛДКС кафедры общей физики Физического факультета, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

Information about the Authors

- Evgeniy I. Palchikov**, Doctor of Technical Sciences, Institute of Hydrodynamics M. A. Lavrentiev SB RAS; Professor, Head of the Department of Continuum Physics (FSS), Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Valery A. Seleznev**, Associate Professor, Head of the Department of General Physics, Faculty of Physics, Leading Engineer for Metrology, Department of Aerospace Research, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)
- Evgeniy G. Alekseev**, lecturer, Leading Engineer, MLDKS, Department of General Physics, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

*Статья поступила в редакцию 14.12.2021;
одобрена после рецензирования 09.06.2022; принята к публикации 22.06.2022
The article was submitted 14.12.2021;
approved after reviewing 09.06.2022; accepted for publication 22.06.2022*

Информация для авторов

«Сибирский физический журнал» публикует обзорные, оригинальные и дискуссионные статьи, посвященные научным исследованиям и методике преподавания физики в различных разделах науки, соответствующих направлениям подготовки на кафедрах физического факультета НГУ. Журнал издается на русском языке, однако возможна публикация статей иностранных авторов на английском языке.

1. Очередность публикации статей определяется их готовностью к печати. Рукописи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.

Вне очереди печатаются краткие сообщения (не более четырех журнальных страниц), требующие срочной публикации и содержащие принципиально новые результаты научных исследований, проводимых в рамках тематики журнала.

Рекламные материалы публикуются при наличии гарантии оплаты, устанавливаемой по соглашению сторон.

2. В журнале печатаются результаты, ранее не опубликованные и не предназначенные к одновременной публикации в других изданиях. Публикация не должна нарушить авторского права других лиц или организаций.

Направляя свою рукопись в редакцию, авторы автоматически передают учредителям и редколлегии права на издание данной статьи на русском или английском языке и на ее распространение в России и за рубежом. При этом за авторами сохраняются все права как собственников данной рукописи. В частности, согласно международным соглашениям о передаче авторских прав за авторами остается право копировать опубликованную статью или ее часть для их собственного использования и распространения внутри учреждений, сотрудниками которых они являются. Копии, сделанные с соблюдением этих условий, должны сохранять знак авторского права, который появился в оригинальной опубликованной работе. Кроме того, авторы имеют право повторно использовать весь этот материал целиком или частично в компиляциях своих собственных работ или в учебниках, авторами которых они являются. В этих случаях достаточно включить полную ссылку на первоначально опубликованную статью.

3. Направлять рукописи в редакцию авторам рекомендуется по электронной почте либо приносить в редакцию электронную версию (в форматах MS WORD – *.doc, или *.docx, или *.rtf) на диске или флэш-памяти. Такая отправка исходных материалов значительно ускоряет процесс рецензирования.

Авторам предлагается посылать свои сообщения в наиболее сжатой форме, совместимой с ясностью изложения, в совершенно обработанном и окончательном виде, предпочтительно без формул и выкладок промежуточного характера и громоздких математических выражений. Не следует повторять в подписях к рисункам пояснений, уже содержащихся в тексте рукописи, а также представлять одни и те же результаты и в виде таблиц, и в виде графиков.

Рекомендованный объем присылаемых материалов: обзорные статьи – до 25-ти страниц, оригинальные материалы – до 12-ти страниц, краткие сообщения – до 4-х страниц. В любом случае объем рукописи должен быть логически оправданным.

Не рекомендуется предоставление электронных копий рукописей в формате LATEX. По техническим условиям издательства в этом случае рукопись будет преобразована редакцией в формат MS WORD, что может привести к значительному увеличению времени обработки рукописи и искажениям авторского текста.

Сокращений слов, кроме стандартных, применять нельзя. Все страницы рукописи должны быть пронумерованы.

4. При отправке файлов по электронной почте просим придерживаться следующих правил: указывать в поле subject (тема) название, номер журнала и фамилию автора; использовать attach (присоединение);

в случае больших объемов информации возможно использование общеизвестных архиваторов (ARJ, ZIP, RAR);

в состав электронной версии рукописи должны входить:

файл, содержащий текст рукописи со вставленными в него рисунками;

отдельные файлы с рисунками высокого качества;

файл со сведениями об авторах (полностью фамилия, имя, отчество, ученые степень и звание, место работы, служебный адрес и телефон, адрес электронной почты для оперативной связи);

файл с переводом на английский язык следующей информации: ФИО авторов, аффилиация, адрес, название статьи, аннотация, ключевые слова, подрисуночные подписи, названия таблиц.

Авторы вставляют рисунки и таблицы в текст рукописи так, как считают нужным. Рукопись обязательно должна быть подписана автором, а при наличии нескольких авторов – всеми соавторами.

Редакция обращает внимание авторов на возможность и целесообразность использования цветного графического материала.

5. В начале рукописи должны быть указаны индекс УДК, название статьи, ФИО авторов (полностью), название и почтовый адрес учреждений, в которых выполнена работа, аннотация, содержащая основные результаты и выводы работы (в английском варианте не менее 1 000 знаков, русский вариант должен соответствовать английскому), ключевые слова, сведения о финансовой поддержке работы.

Например:

УДК 29.19.37; 47.03.08

Оценка конвективного массопереноса

Иван Иванович Иванов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича

Сибирского отделения Российской академии наук

Новосибирск, Россия

ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Аннотация

Ключевые слова

Благодарности

Evaluation of Convective Mass Transfer

Ivan I. Ivanov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics

of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Novosibirsk, Russian Federation

ivan@academ.org, <https://orcid.org/xxxx-xxxx-xxxx-xxxx>

Abstract

Keywords

Acknowledgements

Основной текст статьи

Список литературы / References (в порядке цитирования)**Сведения об авторе / Information about the Author**

Иванов Иван Иванович, доктор физико-математических наук, профессор
Ivan I. Ivanov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor
WoS Researcher ID
Scopus Author ID
SPIN

Подпись автора (авторов)

6. Параметры страницы: формат – А4; ориентация – книжная; поля (см): слева – 2,5; справа – 1; сверху – 2,5; снизу – 2,3; от края до нижнего колонтитула – 1,3.

7. Основной текст: стиль – «Обычный»: гарнитура (шрифт) Times New Roman (Сур), кегль (размер) 12 пунктов, абзацный отступ – 0,5 см, через 1,5 интервала, выравнивание – по ширине.

В тексте рукописи следует избегать аббревиатур, даже таких общепринятых, как ЭДС, ВТСП и т. п. Использование аббревиатур и простых химических формул в заголовках рукописей совершенно недопустимо. Следует писать: высокотемпературная сверхпроводимость, кремний, арсенид галлия и т. п., давая при необходимости соответствующую аббревиатуру или химическую формулу в тексте. Исключение могут составлять формулы сложных химических соединений. Каждое первое употребление аббревиатуры в тексте должно быть четко пояснено.

Не следует:

- производить табуляцию;
- разделять абзацы пустой строкой;
- использовать макросы, сохранять текст в виде шаблона и с установкой «только для чтения»;
- распределять текст по двум или более столбцам;
- расставлять принудительные переносы.

8. Таблицы должны иметь заголовки (на русском и английском языках). В таблицах обязательно указываются единицы измерения величин.

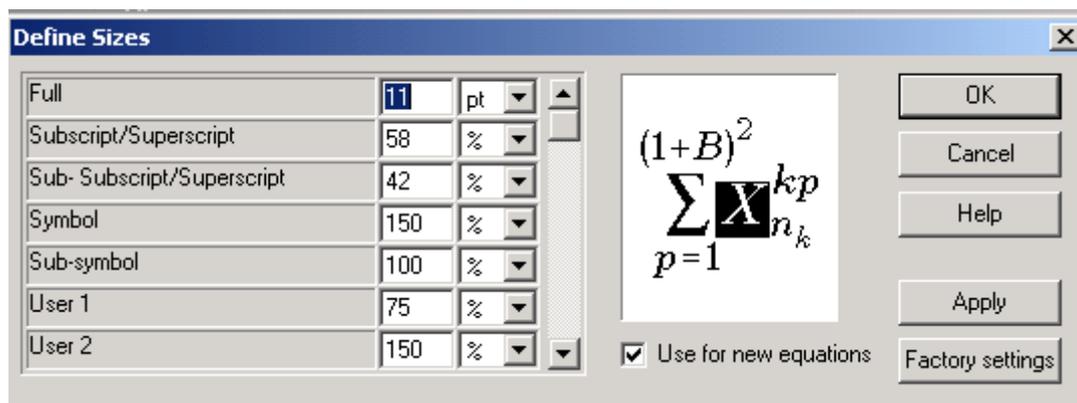
9. Число рисунков должно быть логически оправданным, качество – высоким. Файлы изображений должны находиться в том же каталоге, что и основной документ и иметь имена, соответствующие номерам рисунков в рукописи (например, 09.tif или 22a.jpg).

10. Подписи к рисункам (на русском и английском языках) в электронной версии рукописи выполняются под рисунками, точка в конце не ставится. Если имеется несколько рисунков, объединенных одной подписью, они обозначаются русскими строчными буквами: а, б, в...

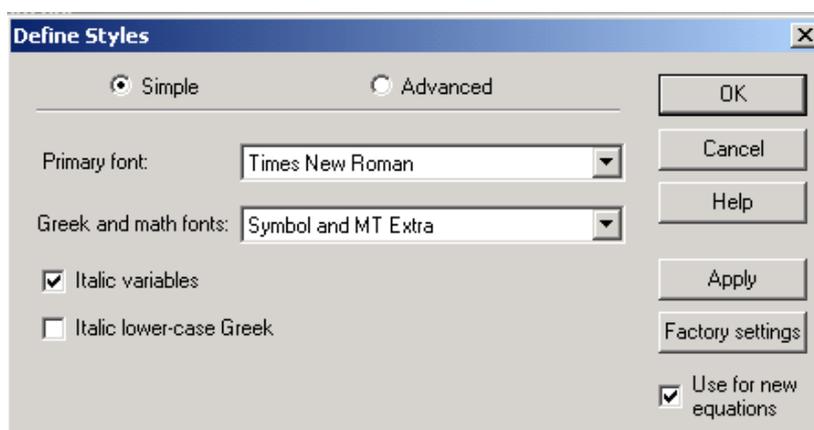
11. Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation MathType в подбор к тексту или отдельной строкой по центру, **кегль 11 пт.**

Нумерация формул сквозная, в круглых скобках, прижатых к правому полю. Нумеровать следует только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Настройки редактора формул



a



б

12. Библиографические ссылки. В тексте в квадратных скобках арабскими цифрами указывается порядковый номер научного труда в библиографическом списке, например: [2; 3], [4–6] и т. д. В конце рукописи помещается список литературы в порядке упоминания в рукописи. Ссылки на российские издания приводятся на русском языке и сопровождаются переводом на английский язык (в отдельной строке, но под тем же номером). Библиографическое описание публикации включает: фамилию и инициалы автора, полное название работы, а также издания, в котором опубликована (для статей), город, название издательства, год издания, том (для многотомных изданий), номер, выпуск (для периодических изданий), объем публикации (количество страниц – для монографии, первая и последняя страницы – для статьи).

Ссылки на интернет-источники, базы данных и т. п. ресурсы, не поддающиеся библиографическому описанию, оформляются в виде примечаний (сносок).

13. В конце рукописи авторы могут поместить список использованных обозначений и сокращений.

14. Возвращение рукописи на доработку не означает, что рукопись уже принята к печати. Доработанный вариант необходимо прислать в редакцию в электронном виде с соблюдением всех требований вместе с ее начальной версией, рецензией и ответом на замечания рецензента не позднее двух месяцев со дня его отсылки. В противном случае первоначальная дата поступления рукописи при публикации не указывается.

15. Решение редакционной коллегии о принятии рукописи к печати или ее отклонении сообщается авторам.

В случае приема рукописи к публикации авторы должны прислать или передать в редакцию два бумажных экземпляра рукописи. Материалы печатаются на принтере на одной стороне стандартного (формат А4) листа белой бумаги. При этом тексты рукописи в бумажной и электронной версиях должны быть идентичными.

16. К рукописи прилагаются письмо от учреждения, в котором выполнена работа, и экспертное заключение о возможности ее опубликования в открытой печати. Если коллектив авторов включает сотрудников различных учреждений, необходимо представить направления от всех учреждений.

Сообщения, основанные на работах, выполненных в учреждении (учреждениях), должны содержать точное название и адрес учреждения (учреждений), публикуемые в статье.

17. После подготовки рукописи к печати редакция отправляет авторам электронную версию статьи с просьбой срочно сообщить в редакцию электронной почтой о замеченных опечатках для внесения исправлений в печатный текст.

18. После выхода журнала статьи размещаются на сайте физического факультета НГУ, а также на сайте Научной электронной библиотеки (elibrary.ru).

Адрес редакции

Физический факультет, к. 140 главного корпуса НГУ
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090,
редакция «Сибирского физического журнала»

тел. +7 (383) 363 44 25
physics@vestnik.nsu.ru

