

Д. В. Куликов^{1}, Д. А. Ланшаков¹, В. А. Павлов¹, В. В. Рахманов¹*

Исследование структуры интерференционной картины, образованной полупроводниковым лазерным доплеровским анемометром с дифференциальной оптической схемой и модуляцией 80 МГц

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: kulikov.dmitriy@gmail.com

Аннотация. В рамках задачи развития методов фазовой доплеровской анемометрии разработан метод исследования структуры интерференционной картины, образованной полупроводниковым лазерным доплеровским анемометром с дифференциальной оптической схемой и модуляцией 80 МГц. Описаны основные аппаратные модули используемых лазерных доплеровских анемометров «ЛАД-080». Для исследования интерференционной картины был создан стенд из двух лазерных доплеровских анемометров и мишени. Лазерные анемометры модернизировались с целью синхронного наблюдения сигналов на выходе квадратурного демодулятора. Получены интерференционные картины измерительного объема доплеровского анемометра. Настройка оптической схемы и фильтрация сигнала позволила избавиться от дефектов интерференционной картины и получить равномерное поле.

Ключевые слова: фазовая доплеровская анемометрия, лазерным доплеровский анемометр, интерференционная картина

D. V. Kulikov^{1}, D. A. Lanshakov¹, V. A. Pavlov¹, V. V. Rakhmanov¹*

Investigation of the Structure of the Interference Pattern Formed by Semiconductor Laser Doppler Anemometer with Differential Optical Scheme and 80 Mhz Modulation

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kulikov.dmitriy@gmail.com

Abstract. Within the framework of the task of developing methods of phase Doppler anemometry, a method has been developed for studying the structure of an interference pattern formed by a semiconductor laser Doppler anemometer with a differential optical scheme and modulation of 80 MHz. The main hardware modules of the used laser Doppler anemometers "LAD-080" are described. To study the interference pattern, a stand was created, consisting of two laser Doppler anemometers and a target. Laser anemometers were modernized for the purpose of synchronous observation of signals at the output of the quadrature demodulator. The interference patterns of the measuring volume of the Doppler anemometer were obtained. Adjusting the optical scheme and filtering the signal made it possible to get rid of the defects in the interference pattern and obtain a uniform field.

Keywords: phase Doppler anemometry, laser Doppler anemometer, interference pattern

Введение

Методы лазерной анемометрии позволяют реализовать большое количество методов бесконтактного контроля объектов на основе когерентного излучения [1,2].

Измерение размеров капель аэрозоля – важная задача для авиации, промышленности и научных исследований [3,4].

Фазовая доплеровская анемометрия – это бесконтактный точечный способ измерения размеров капель с помощью когерентного излучения. Падающий на поверхность капли свет частично отражается от поверхности, частично преломляется в прямом и обратном направлениях и улавливается двумя и более фотодетекторами [5]. После преобразования в электрический сигнал определяется фазовая задержка, по величине которой определяется диаметр частицы.

В рамках глобальной задачи развития методов фазовой доплеровской анемометрии авторами был взят за основу Лазерный доплеровский анемометр «ЛАД-080» созданный в Институте теплофизики СО РАН совместно с ОАО «ИОИТ» [6].

Анемометр использует дифференциальную оптическую схему с модуляцией на частоте 80 МГц, и наблюдение интерференционной картины визуально, с помощью глаза невозможно.

Передающий тракт «ЛАД-080» устроен таким образом (рис. 1), что расщепление лазерного луча происходит при помощи акустооптического модулятора (АОМ) [7,8]. Луч с частой излучения F_L от источника лазерного излучения 1, попадает на АОМ 2 и за счет дифракции на бегущей ультразвуковой волне на частоте F_M расщепляется на несколько лучей. После АОМ частота излучения одного из лучей смещается на величину F_M , равную 80 МГц [9].

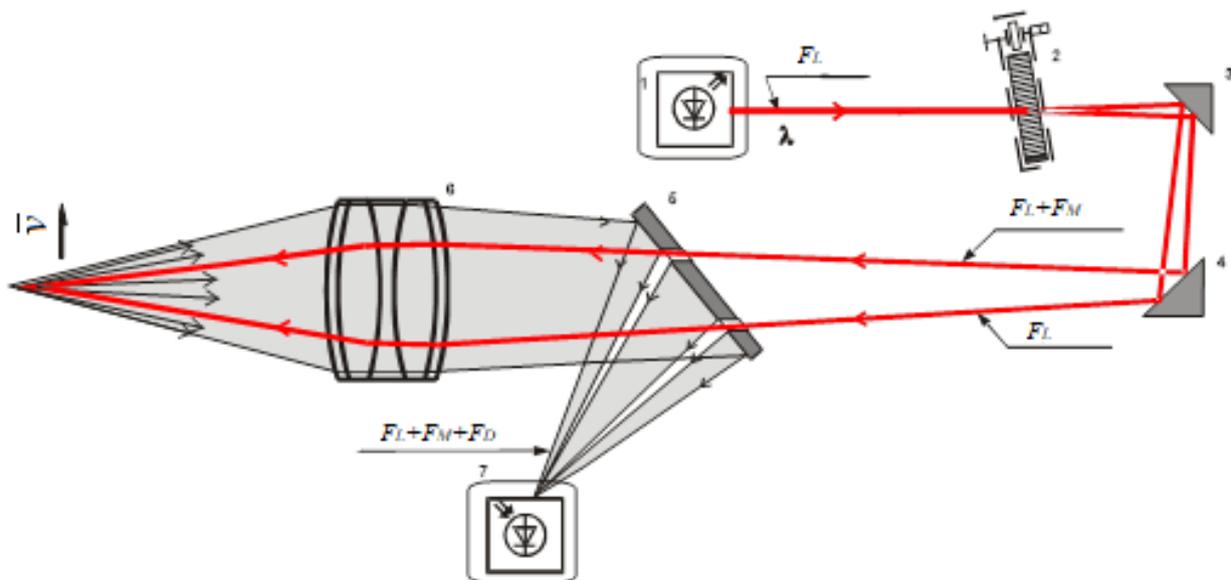


Рис. 1. Функциональная схема оптического тракта «ЛАД-080»: 1 – лазерный излучатель; 2 – акусто-оптический модулятор; 3, 4, 5 – зеркала; 6 – объектив; 7 – фотоприемник

Выделение доплеровской частоты F_D из высокочастотной составляющей сигнала в «ЛАД-080» реализовано с помощью демодуляции сигнала квадратурным демодулятором. Демодулятор переносит спектр выходного сигнала фотоприемника из области частоты модуляции F_M в область нулевой частоты (рис. 2.).

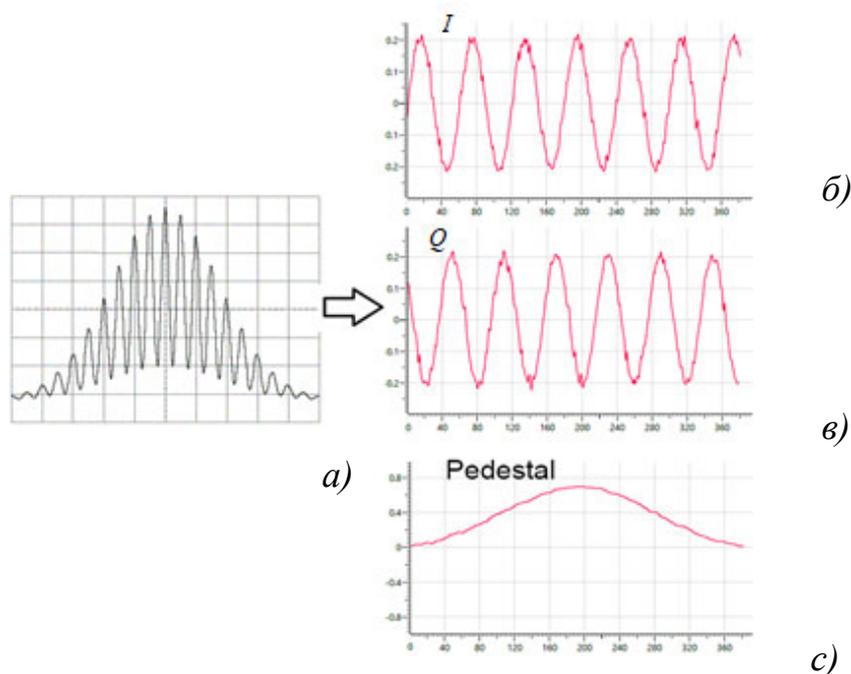


Рис. 2. Результат квадратурной демодуляции: а) – исходный сигнал, б) – I компонента демодулированного сигнала, в) – Q компонента демодулированного сигнала, г) – пьедестал

Для создания методов фазовой доплеровской анемометрии требуется исследование структуры интерференционной картины измерительного объема доплеровского анемометра.

Целью работы является разработка метода исследования структуры интерференционной картины, образованной полупроводниковым лазерным доплеровским анемометром с дифференциальной оптической схемой и модуляцией 80 МГц.

Методы и материалы

Для исследования интерференционной картины был создан стенд, состоящий из двух лазерных доплеровских анемометров на координатно перемещающем устройстве, мишени с закрепленной прозрачной нитью известного диаметра. Мишень имела возможность колебаться линейно с заданной скоростью \vec{V} .

В пространстве мишени с помощью ЛДА 1 формируется измерительный объем в месте пресечения лазерных лучей, нить, закрепленная на мишени, при пересечении со скоростью \vec{V} рассеивает оптическое излучение, которое регистрируется фотоприемником ЛДА 1 и фотоприемником ЛДА 2.

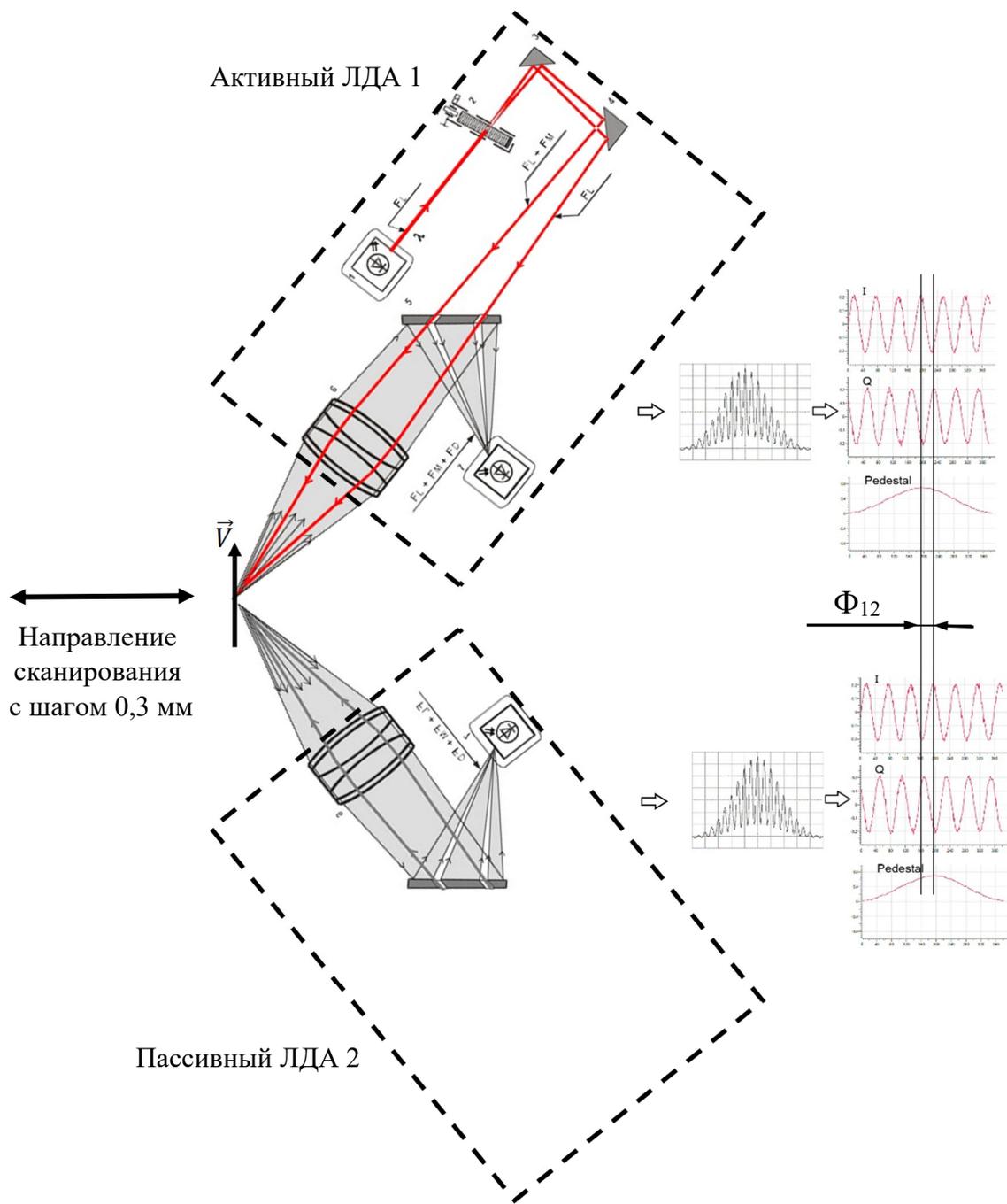


Рис. 3. Функциональная схема стенда исследования интерференционной картины с помощью двух лазерных доплеровских анемометров (ЛДА) и мишени

При прохождении лучей через сферическую частицу из-за разной длины оптического пути волновые фронты будут сдвинуты друг относительно друга. Фазовые сдвиги приведут к интерференционной картине в поле, окружающем сферическую частицу. Расстояние между интерференционными полосами зависит от угла пересечения лучей, длины световой волны и обратно пропорционально

диаметру сферы. Из-за меньшей кривизны крупные частицы создают картину рассеянных полос с меньшим расстоянием между полосами S_f , т. е. диаметр частиц обратно пропорционален S_f :

$$D \sim \left(\frac{1}{S_f} \right). \quad (1)$$

Лазерные анемометры были модернизированы с целью синхронного наблюдения сигналов ЛДА 1 и ЛДА 2 (рис. 3) на выходе квадратурного демодулятора. На осциллографе происходила оцифровка и сохранение двух квадратурных пар I и Q и низкочастотной составляющей исходного сигнала с фотоприемника – пьедестал. Запаздывание в каналах квадратурной пары $I(t)$ и $Q(t)$ между приборами ЛДА 1 и ЛДА 2 будет прямо пропорционально диаметру частиц $\Phi_{12} \sim D$.

Для корректного определения значения Φ_{12} требуется равномерность частоты квадратурной пары $I(t)$ и $Q(t)$ во всем измерительном объеме обоих ЛДА. Для проверки равномерности было проведено сканирование измерительного объема.

При пересечении прозрачной нитью измерительного объема формировался сигнал как результат перерассеивания и переотражения излучения, сформированного в сечении, совпадающем с траекторией движения нити. Перемещение лазерной системы на координатно-перемещающем устройстве приводило к сканированию измерительного объема, в соответствии с величиной перемещения.

Был выбран шаг 0,3 мм и получено 20 сечений измерительного объема.

Результаты

В результате анализа, полученных сечений измерительного объема доплеровского анемометра выявлена неравномерность следования интерференционных полос (рис. 4). Визуализирована неравномерность в центре измерительного объема. Настройка оптической схемы и фильтрация сигнала позволила избавиться от дефектов интерференционной картины и получить равномерное поле. Сигнал, полученный с периферии измерительного объема, кроме высокой неравномерности интерференционных полос имеет еще и обую низкую интенсивность, что позволяет фильтровать данные из этих областей как недо-стоверные.

Использование диафрагмы в приемном оптическом тракте с целью фильтрации периферийной области позволяет получать данные с высокой точностью, что позволяет увеличивает точность оценки параметров потоков.

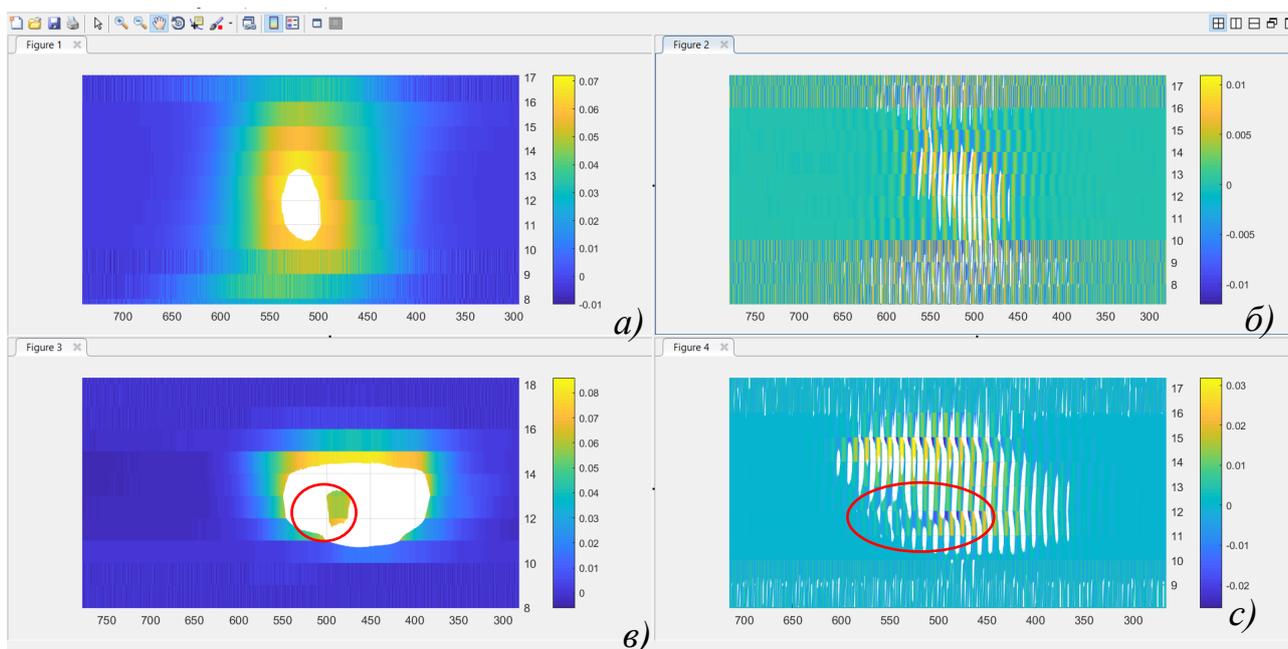


Рис. 4. Распределение интерференционных полос в измерительном объеме нить: а) пьедестал после оптимизации, б) интерференционная картина после оптимизации, в) пьедестал до оптимизации (выделены дефекты), с) интерференционная картина до оптимизации (выделены дефекты)

Заключение

В рамках задачи развития методов фазовой доплеровской анемометрии разработан метод исследования структуры интерференционной картины, образованной полупроводниковым лазерным доплеровским анемометром с дифференциальной оптической схемой и модуляцией 80 МГц.

Модернизированы лазерные доплеровские анемометры «ЛАД-080» с целью синхронного наблюдения сигналов на выходе квадратурного демодулятора. Для исследования интерференционной картины был создан стенд из двух лазерных доплеровских анемометров. В результате работы создан метод исследования измерительного объема доплеровского анемометра.

Получены интерференционные картины измерительного объема доплеровского анемометра, выявлена неравномерность следования интерференционных полос.

Настройка оптической схемы и фильтрация сигнала позволила избавиться от дефектов интерференционной картины и получить равномерное поле.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meledin, V. (2015). Information optoelectronic diagnostics. The science and innovative industrial technologies / Novosibirsk: Academizdat. ISBN978-5-9907241-7-4.
2. Meledin, V. (2014). Optoelectronic information systems for science and industry. In Sbornik materialov Interekspo Geo-Sibir'-2014: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. SibOptika-

2014 [Proc. of Interexpo GEO-Siberia-2014: International Scientific Conference: Vol. 1. SibOptics-2014] (pp. 3–12). Novosibirsk: SSGA [in Russian].

3. В. С. Соболев, Г. А. Кашеева Потенциальная точность методов лазерной доплеровской анемометрии в режиме одночастичного рассеяния // Автометрия, 2017. – Т. 53, № 3. – С. 74–80.

4. А.В. Бильский, Ю.А. Ложкин, Д.М. Маркович Интерферометрический метод измерения диаметров капель // Теплофизика и аэромеханика, 2011. – Т. 18, № 1. – С. 1–13.

5. Ofner, B. (2001). Phase Doppler Anemometry (PDA). In: Mayinger, F., Feldmann, O. (eds) Optical Measurements. Heat and Mass Transfer. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-56443-7_9.

6. Меледин В.Г. Лазерная доплеровская полупроводниковая анемометрия // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lazernaya-doplerovskaya-poluprovodnikovaaya-anemometriya> (дата обращения: 27.04.2023).

7. Павлов В.А., Бакакин Г.В., Главный В.Г., Кротов С.В., Куликов Д.В., Рахманов В.В., Садбаков О.Ю. Акустооптический коммутатор оптических измерительных каналов лазерных доплеровских анемометров // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8934> (дата обращения: 14.03.2023).

8. V V Rakhmanov et al, 2021. J. Phys.: Conf. Ser. 2057 012088.

9. Рахманов В. В., Меледин В. Г., Наумов И. В., Куликов Д. В. Пат. 2612202 Российская Федерация, МПК G 01 P 3/36. Способ измерения полного вектора скорости в гидротоках с помощью лазерного доплеровского анемометра (ЛДА); патентообладатель ИТ СО РАН. – № 2015148289; заявл. 10.11.2015; опублик. 03.03.2017, Бюл. № 7.

10. Rakhmanov V., Kulikov D. The analysis of applicability of the refractive-index-matching method for flow investigation by LDA method in models of the fire chambers of complex geometry // Thermophysical Basis of Energy Technologies, EPJ Web of Conferences, 2014. – Vol. 76. – 1008–4.

11. Bogatko, T.V.; Chinak, A.V.; Evdokimenko, I.A.; Kulikov, D.V.; Lobanov, P.D.; Pakhomov, M.A. The Effect of a Backward-Facing Step on Flow and Heat Transfer in a Polydispersed Upward Bubbly Duct Flow. Water 2021, 13, 2318. <https://doi.org/10.3390/w13172318>.

12. Kabardin I. K., Meledin V. G., Yavorskiy N. I., Pavlov V. A., Pravdina M. H., Kulikov D. V., Rahmanov V. V. Small disturbance diagnostic inside the vortex tube with a square crosssection // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Perm, Russia, June 27 – July 3, 2016). – Perm, 2016. – P. 110–111.

13. Alekseenko S. V., Anufriev, I. S. Glavniy V. G., Krasinsky D. V., Rakhmanov V. V., Salomatov V. V., Shadrin E. Yu. Study of 3D Flow Structure and Heat Transfer in a Vortex Furnace // Heat Transfer Research. – 2016. – Vol. 47 (7). – P. 653–667.

© Д. В. Куликов, Д. А. Ланишаков, В.А. Павлов, В. В. Рахманов, 2023