

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья

УДК 004.93+520.33+536.46

DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-6-12

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ФРОНТА ПЛАМЕНИ

Максим Михайлович Алексеев¹, Олег Юрьевич Семенов^{2✉}

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

² ous.tutor.phinma@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

Аннотация. В работе описан метод обработки видеозаписей распространения фронта пламени в узких каналах с помощью библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV. Результаты автоматизированной обработки использованы для получения новых сведений об устойчивости и топологии пламени в плоском канале типа Хеле-Шоу. Получена зависимость видимой скорости от ширины зазора канала, свидетельствующая об увеличении скорости распространения пламени при увеличении зазора вследствие меньшего влияния вязкости и теплотеря.

Ключевые слова: горение, компьютерное зрение, фотографирование, визуализация, канал Хеле-Шоу, ячеистые пламена, OpenCV, экспериментальная установка

Для цитирования: Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Применение системы компьютерного зрения для экспериментального изучения движения фронта пламени // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 6–12. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-6-12.

Original article

APPLYING A COMPUTER VISION SYSTEM FOR STUDYING FLAME FRONT PROPAGATION IN AN EXPERIMENT

Maksim M. Alekseev¹, Oleg Yu. Semenov^{2✉}

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

² ous.tutor.phinma@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

Abstract. The article describes a method for processing of video recordings of flame front propagation in narrow channels using a computer vision library based on the open source code OpenCV. Using the results of machine processing, new data on flame sustainability and topology in a two-dimensional Hele-Shaw channel were obtained. The dependence of apparent speed on the channel gap width demonstrates that the wider the gap, the faster the flame propagation growth due to reduced influence of viscosity and heat loss.

Keywords: combustion, computer vision, photoshooting, visualization, Hele-Shaw channel, cellular flame, OpenCV, test setup

For citation: Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Applying a computer vision system for studying flame front propagation in an experiment. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):6–12. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-6-12.

ВВЕДЕНИЕ

Программные средства обработки цифровых изображений позволяют использовать

новые возможности исследования процесса распространения фронта пламени. К таким возможностям относятся, например, обработ-

ка распределений интегральной энергетической светимости, высокоскоростная съемка фиксации формы и получение мгновенных положений фронта пламени.

Распространение пламени в каналах и камерах сгорания различной геометрии привлекало внимание многих исследователей. Одним из способов, который упрощает изучение распространения предварительно перемешанного пламени, заключается в использовании ячейки Хеле-Шоу в качестве камеры сгорания. Ячейка Хеле-Шоу представляет собой две параллельные пластины, разделенные малым зазором. Подобные ячейки используются для аналогового моделирования фильтрационных течений в пористых средах. Двумерная геометрия канала Хеле-Шоу приводит к формированию квазидвумерного фронта пламени, что позволяет регистрировать и визуализировать его эволюции более подробно, чем в полных трехмерных конфигурациях. Теория ячеистого распространения пламени в двумерном канале была развита в работах [1, 2], где анализировалось влияние потерь тепла и импульса на неустойчивость и скорость пламени, изучение влияния числа Льюиса проводилось в работах [3–7].

В дополнение к изучению общей динамики пламени и развития неустойчивости были также проведены эксперименты с ячейкой Хеле-Шоу для анализа колебательного пове-

дения пламени [8] и взаимодействия виброакустических волн с пламенем [9]. Воспламенение газовой смеси в разных точках канала способствует изменению импульса и теплоотдачи, приводящее к значительным возмущениям поля течения, растяжению, деформации или разделению на ячейки фронта пламени, увеличивающие площадь его поверхности [10]. При исследовании пламени также необходимо учитывать его собственные неустойчивости различных типов (Дарье – Ландау, диффузионно-тепловые и др.) [11–14].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для изучения движения фронта пламени в узком зазоре между параллельными пластинами и эволюции его ячеистой структуры, формирующейся вследствие развития различных неустойчивостей. Стенки канала образованы двумя параллельными прозрачными стеклянными дисками диаметром 60 см. В центре нижнего диска находилось отверстие, предназначенное для установки системы подачи газовой смеси и электродов ее воспламенения. Ширина зазора между дисками менялась в экспериментах в диапазоне от 2,0 до 4,4 мм. Расстояние между дисками выставлялось с точностью до 0,001 мм с помощью калиброванных шайб, помещенных между дисками на их краях.

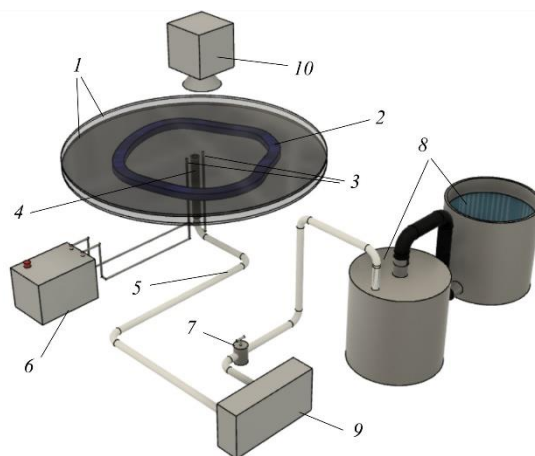


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – прозрачные диски, 2 – фронт пламени, 3 – искровые электроды,
4 – входное сопло с пламегасителем, 5 – шланг подачи смеси, 6 – искровой разрядник, 7 – вентиль,
8 – газометр вытеснения, 9 – расходомер-счетчик газа, 10 – видеокамера

Примечание: составлено авторами.

Эксперименты проводились со стехиометрическими и богатыми топливными смесями пропана-воздуха (коэффициент избытка горючего находился в диапазоне $\varphi = 1,00\text{--}1,25$). Горючая смесь необходимой концентрации готовилась в газометре вытеснения. Пространство между параллельными пластинами заполнялось смесью через шланг, прикрепленный к центральному отверстию, который оборудован пористым пламегасителем. Для измерения объема подаваемого газа между пластинами применялся расходомер газа РГС-2 с относительной точностью 2 %.

Для получения детальной картины формирования и движения фронта пламени в плоском канале фото- и видеокамеры размещались непосредственно над прозрачной пластиной. Все эксперименты проводились в темном помещении без фонового света. Движение фронта пламени регистрировалось видеокамерой Xiaomi Yi. Видеокамера оснащена 16-мегапиксельным $6,17 \times 4,55$ мм CMOS-датчиком изображения, который позволяет снимать видео с частотой 120 кадров в секунду с разрешением $1\,280 \times 720$ точек. Видеокамера устанавливалась на высоте 455 мм над дисками. Дополнительно над дисками устанавливалась фотокамера Canon EOS 30D на высоте 840 мм. Фотоаппарат Canon EOS 30D имеет $22,5 \times 15,0$ мм CMOS-датчик с эффективным разрешением 8,2 мегапикселя. Фотокамера использовалась в двух режимах – с краткосрочной экспозицией ($1/500$ с), чтобы производить фотосъемку

мгновенного положения и формы фронта пламени, и в режиме с длительной выдержкой, что позволяло получить след на изображении от движения фронта пламени в течение времени, при котором открыт затвор камеры. Последний режим позволил проследить эволюцию ячеистой структуры пламени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Горизонтальная ячейка Хеле-Шоу, образованная двумя стеклянными дисками, позволяла получать цилиндрические пламена, инициированные искровым зажиганием. С помощью методики визуализации, основанной на методе прямого фотографирования с длительной выдержкой, были зафиксированы не только мгновенная форма фронта пламени, но и траектории движения узловых точек, разделяющих соседние ячейки фронта пламени. Из фотографий, полученных этим способом, можно увидеть, что средний горизонтальный размер ячейки возмущения, развивающейся в пламени стехиометрической смеси, примерно в 10 раз превышает ширину зазора между пластинами. Обращает на себя внимание тот факт, что при центральном зажигании смеси ячеистый фронт пламени сохраняет симметрию. Типичное изображение с камеры Canon EOS 30D, иллюстрирующее применение этого метода и эволюцию роста и гибели возмущений на поверхности фронта, показано на рис. 2.

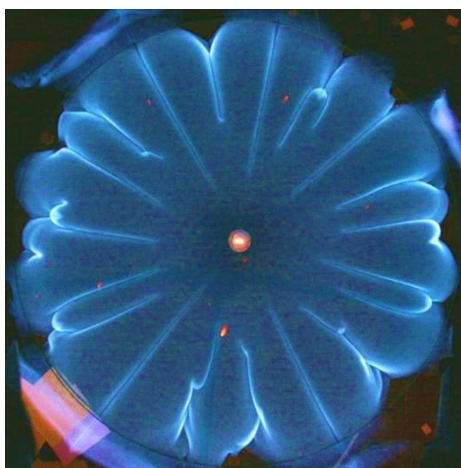


Рис. 2. Фотографирование газозвушного пламени с длительной выдержкой
(расстояние между дисками 4,5 мм)

Примечание: фото авторов.

Яркие линии на фотографии, расходящиеся от центра дисков, являются траекториями движения границ между ячейками на поверхности фронта. Раздвоение (бифуркация) линий или их смыкание свидетельствуют о факте рождения или гибели возмущений. По траекториям движения складок между ячейками видно, что процесс роста-гибели

возмущений является непрерывным – гибель возмущений происходит по всей плоскости канала, что обусловлено смещением возмущений к стенкам канала из-за кривизны фронта пламени. В то же время рост новых возмущений связан, очевидно, с появлением участков, в которых происходит локальное повышение температуры (рис. 3).

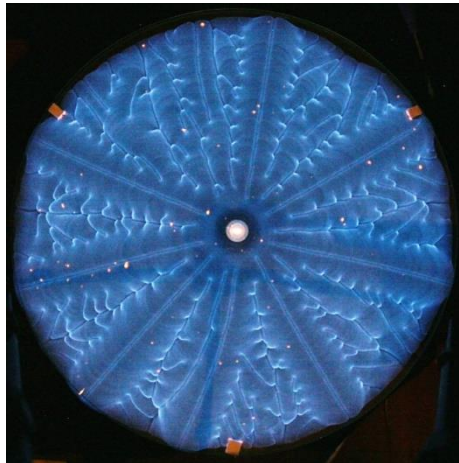


Рис. 3. Фотография фронта пламени между дисками на расстоянии 3 мм между ними, полученная при длительной экспозиции

Примечание: фото авторов.

Для получения количественных характеристик движения фронта пламени и эволюции возмущений на нем каждая из видеозаписей с камеры Xiaomi Yi для разных величин зазора между дисками преобразовывалась в набор кадров и обрабатывалась с использованием алгоритмов библиотеки OpenCV [15]. Цель такой обработки – получение координат точек фронта пламени в виде функции в полярных координатах $r = f(\varphi)$, где r – это расстояния до точек фронта пламени от точки зажигания (начала координат), а φ – полярный угол, отсчитываемый от нулевого луча (горизонтальная линия на фотографиях, проходящая через точку зажигания). Фронт пламени, представленный в виде массива координат его точек, позволяет в дальнейшем проводить автоматизированную обработку его параметров.

Видеокадры, полученные в условиях низкой освещенности, подвержены высоким уровням «шума», поэтому изображения предварительно «размывались» с помощью билатерального фильтра (bilateral filter), который довольно эффективен в удалении шумов.

При этом еще и позволяет сохранить четкие границы объектов на фотографиях. Фотографии из цветового пространства RGB преобразовывались в цветовое пространство в градациях серого с последующим применением фильтра по порогу интенсивности (threshold by intensity filter). Результатом этого шага является черно-белое изображение, на котором каждому пикселю фронта пламени присваивается значение, соответствующее белому цвету, а пикселю фона – черному цвету. Пороговое значение для этого фильтра подбиралось вручную для данной серии экспериментов (для серии, из которой был взят кадр, представленный на рис. 4, пороговое значение равно 30). Эти два шага позволяют удалить любой фоновый шум и посторонние объекты на изображениях и оставить только фронт пламени. После удаления шума и фона производилось определение координат внешнего контура фронта пламени с помощью функции findContours() библиотеки OpenCV. Пример кадра с изображением фронта пламени и результат его обработки приведен на рис. 4.

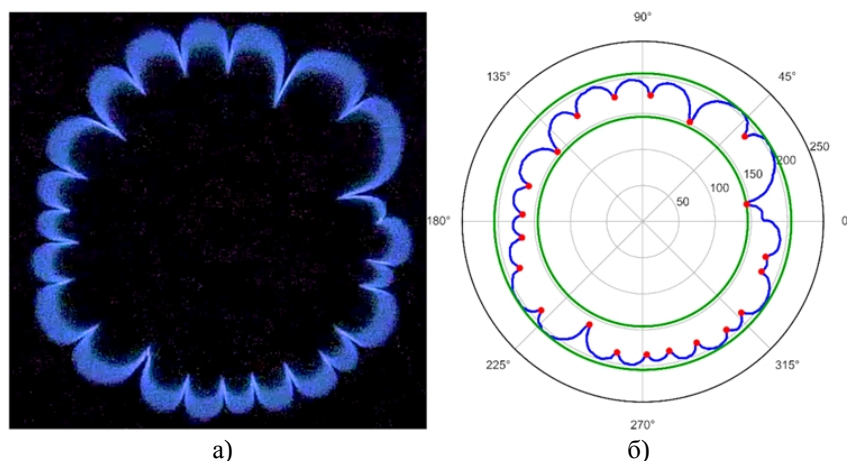


Рис. 4. Видеокادر фронта пламени, распространяющегося в зазоре (а), и рисунок обработанного внешнего края фронта пламени, край представлен кривой в полярных координатах (б)

Примечание: фото авторов.

Величины амплитуд (радиальные размеры) возмущений были получены как разность радиусов наименьшей описанной и наибольшей вписанной окружностей фронта пламени. На рис. 4б представлена в полярных координатах функция $r = f(\varphi)$, соответствующая точкам фронта пламени, вписанная и описанная окружности. Радиус самой большой вписанной окружности для каждого фронта пламени был получен в качестве абсолютного минимума функции $r = f(\varphi)$, задающей форму фронта пламени. Радиус наименьшей окружности, в которую помещается фронт пламени, определен с помощью функции `minEnclosingCircle()`, примененной к массиву координат, соответствующих внешнему контуру фронта пламени.

Размеры возмущений в тангенциальном направлении к фронту пламени получены путем нахождения координат узловых точек или «складок» на фронте пламени. Такие «складки» на поверхности пламени также соответствуют локальным минимумам функции $r = f(\varphi)$. Красными точками на рис. 4 показаны определенные таким образом положения узловых точек и одновременно минимумов функции $r = f(\varphi)$.

График зависимости видимой скорости распространения пламени от расстояния между дисками показан на рис. 5. Средние скорости фронта пламени при различных зазорах найдены методом наименьших квадратов как коэффициенты наклона прямых, аппроксимирующих зависимости радиуса фронта пламени

от времени, после автоматизированной обработки видеозаписей указанным выше способом. За радиус фронта пламени была взята наименьшая описанная вокруг фронта окружность (рис. 4). Автоматизированная обработка множества видеозаписей позволила получить детальную зависимость скорости фронта пламени от величины зазора канала. Анализ данных зависимостей позволяет сделать вывод, что скорость пламени с увеличением зазора растет нелинейно и резко увеличивается, когда ширина зазора начинает превышать 4 мм. На графике (рис. 5) погрешности, указанные для точек скоростей распространения, соответствуют среднеквадратичной ошибке.

Для оценки повторяемости результатов проведена дополнительная серия экспериментов. В этой серии тесты повторялись с той же концентрацией и шириной промежутка, но результаты обрабатывались вручную путем нахождения вписанных и описанных окружностей фронта пламени на десяти выбранных точках, затем скорость пламени была найдена с помощью линейной регрессии. Полученные результаты показаны на рис. 5 крестиками. Видно, что для ширины зазора 2:4–3:3 мм повторяемость очень хорошая (в пределах 1 %), при дальнейшем увеличении ширины зазора до 3,6 мм разница увеличивается примерно до 10 %, а для более широких зазоров (более 3,8 мм) повторяемость ухудшается, для самого широкого зазора 4,4 мм результаты снова довольно хорошо совпадают.

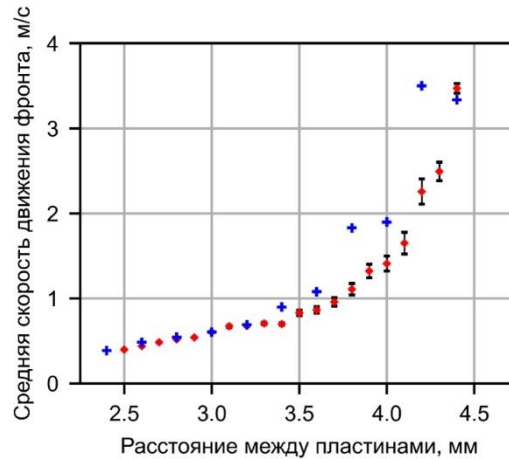


Рис. 5. График зависимости скорости пламени от расстояния между дисками

Примечание: составлено авторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты автоматизированной обработки изображений фронта пламени в узком плоском канале Хеле-Шоу с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV. Автоматизация измерений позволила обработать большое количество видеозаписей и кадров фронта пламени при его распространении в узком канале. Совместное использование метода моментальной фотосъемки и метода длительной экспозиции позволяет выявить законо-

мерности эволюции возмущений на поверхности фронта пламени.

Показано, что особенностью распространения фронта пламени в узком канале является формирование ячеистой структуры пламени, которая наблюдается при горении смесей как с избытком, так и с недостатком воздуха. С помощью методов компьютерного зрения определены детальные зависимости амплитуды, тангенциальные размеры возмущений, скорости распространения расходящегося пламени в узком канале от его ширины.

Список источников

1. Joulin G., Sivashinsky G. I. Influence of momentum and heat losses on the large-scale stability of quasi-2D premixed flames. *Combust Sci Technol.* 1994;98:11–23.
2. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies.* 2023;16(3):1516.
3. Wongwiwat J., Gross J., Ronney P. D. Flame propagation in narrow channels at varying Lewis number. In: *Proceedings of the 25th ICDERS*, Leeds, UK, August 2–7, 2015. p. 3–8.
4. Almarcha C., Radisson B., Al Sarraf E. et al. Interface dynamics, pole trajectories, and cell size statistics. *Phys Rev E.* 2018;98:030202.
5. Tayyab M., Radisson B., Almarcha C. et al. Experimental and numerical Lattice-Boltzmann investigation of the Darrieus – Landau instability. *Combust Flame.* 2020;221:103–109.
6. Alexeev M. M., Semenov O. Y., Yakush S. E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates. *Combust Sci Technol.* 2018;191(7):1256–1275.

References

1. Joulin G., Sivashinsky G. I. Influence of momentum and heat losses on the large-scale stability of quasi-2D premixed flames. *Combust Sci Technol.* 1994;98:11–23.
2. Yakush S., Semenov O., Alexeev M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies.* 2023;16(3):1516.
3. Wongwiwat J., Gross J., Ronney P. D. Flame propagation in narrow channels at varying Lewis number. In: *Proceedings of the 25th ICDERS*, Leeds, UK, August 2–7, 2015. p. 3–8.
4. Almarcha C., Radisson B., Al Sarraf E. et al. Interface dynamics, pole trajectories, and cell size statistics. *Phys Rev E.* 2018;98:030202.
5. Tayyab M., Radisson B., Almarcha C. et al. Experimental and numerical Lattice-Boltzmann investigation of the Darrieus – Landau instability. *Combust Flame.* 2020;221:103–109.
6. Alexeev M. M., Semenov O. Y., Yakush S. E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates. *Combust Sci Technol.* 2018;191(7):1256–1275.

7. Jang H. J., Jang G. M., Kim N. I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps. *Proc Combust Inst.* 2019;37(2):1861–1868.
8. Veiga-López F., Martínez-Ruiz D., Fernández-Tarrazo E. et al. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele-Shaw cell propagating towards a closed end. *Combust Flame.* 2019;201:1–11.
9. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames. *Phys Rep.* 2000;325(4–5):115–237.
10. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu Rev Fluid Mech.* 2007;39:163–191.
11. Zeldovich Y. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B. et al. The mathematical theory of combustion and explosions. New York: Springer; 1985. 619 p.
12. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of vibro-acoustic waves with premixed flame. *Phys Rev Fluids.* 2019;4(12):121201.
13. Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V. N., Ronney P. D. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates. *Combust Flame.* 2018;190:133–145.
14. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture. *Technical Physics Letters.* 2012;38(11):1010–1012.
15. Suarez O. D., Garcia G. B., Aranda J. L. E. et al. Learning image processing with OpenCV. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2015. p. 232.
7. Jang H. J., Jang G. M., Kim N. I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps. *Proc Combust Inst.* 2019;37(2):1861–1868.
8. Veiga-López F., Martínez-Ruiz D., Fernández-Tarrazo E. et al. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele-Shaw cell propagating towards a closed end. *Combust Flame.* 2019;201:1–11.
9. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames. *Phys Rep.* 2000;325(4–5):115–237.
10. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu Rev Fluid Mech.* 2007;39:163–191.
11. Zeldovich Y. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B. et al. The mathematical theory of combustion and explosions. New York: Springer; 1985. 619 p.
12. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of vibro-acoustic waves with premixed flame. *Phys Rev Fluids.* 2019;4(12):121201.
13. Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V. N., Ronney P. D. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates. *Combust Flame.* 2018;190:133–145.
14. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture. *Technical Physics Letters.* 2012;38(11):1010–1012.
15. Suarez O. D., Garcia G. B., Aranda J. L. E. et al. Learning image processing with OpenCV. Birmingham, UK: Packt Publishing; 2015. p. 232.

Информация об авторах

М. М. Алексеев – кандидат физико-математических наук, доцент.

О. Ю. Семенов – кандидат физико-математических наук, доцент.

Information about the authors

M. M. Alekseev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.

O. Yu. Semenov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.