

СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА И ФИЗИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

УДК 536.37

*Д.П. КАСЫМОВ¹, В.В. ПЕРМИНОВ¹, В.В. РЕЙНОВ², А.И. ФИЛЬКОВ^{1,3}, Е.Л. ЛОБОДА¹***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ПО ГЕНЕРАЦИИ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА***

Предлагается уникальная экспериментальная установка по генерации горящих частиц для исследования пожаров, распространяющихся на природно-урбанизированной территории. Приведено краткое описание установки, порядок проведения исследований. В результате проведения серии полунатурных экспериментов на разработанной установке по генерации горящих и тлеющих частиц установлено, что горящие частицы коры сосны, а также веточек сосны переносятся на расстояние 5–10 м в зависимости от скорости подачи набегающего воздушного потока. Данный диапазон расстояний переноса позволяет проводить полунатурные эксперименты по воздействию горящих частиц на напочвенный покров, кроме того, моделировать условия воздействия горящих частиц, образующихся во фронте пожара, на конструкционные материалы (кровли, забора, стен и крыши).

Ключевые слова: природные пожары, экспериментальная установка, горящие частицы, напочвенный покров.

Введение

В последние годы наблюдается увеличение количества природных пожаров на природно-урбанизированных территориях (Wildland Urban Interface Fires, WUI fires). Воспламенение построек в зоне раздела природной и городской сред является серьезной международной проблемой из-за крупномасштабных пожаров в Австралии, Греции, Португалии, Испании и США [1, 2].

Основными факторами, влияющими на воспламенение строительных материалов и распространение таких пожаров, являются радиационный и конвективный перенос тепла от пламени и горящие частицы, которые могут накапливаться на крыше и в углах зданий, заборах или найти иной способ попадания внутрь помещений и привести к их воспламенению [3]. Кроме того, горящие и тлеющие частицы, образующиеся во фронте пожара, могут переноситься ветром и вызвать новые очаги горения перед основным фронтом. Ожидается, что пожары на природно-урбанизированной территории по-прежнему будут серьезной и дорогостоящей проблемой не только в США, Европе и Австралии, но также и в России.

В настоящее время имеется потребность в экспериментально проверенной информации о том, как тлеющие частицы, которые образуются во фронте пожара, воспламеняют постройки в случае пожаров на природно-урбанизированной территории, являясь также источниками городских пожаров. Отсутствие таких данных делает невозможным развитие методов прогноза пожарной опасности, а также совершенствование мер и рекомендаций для проведения более оперативной и эффективной работы по предотвращению возгораний, локализации и тушению низовых лесных пожаров в условиях близости к жилым застройкам.

Таким образом, необходимо использование специальных научно-измерительных комплексов, позволяющих моделировать перенос горящих частиц и регистрацию их воздействия на напочвенный покров и деревянные постройки в натурных условиях. Эксперименты с использованием таких установок активно ведутся научными коллективами из США, Китая, Португалии, Великобритании и направлены на изучение воспламенения напочвенного покрова под воздействием горящих частиц [3–6], определении траектории полета частиц [7–10], а также определения стойкости строительных и защитных материалов при воздействии горящих частиц [11, 12].

Обзор имеющихся установок по генерации горящих частиц

Первым прототипом установки, позволяющим генерировать тлеющие и горящие частицы, является генератор обгоревших частиц «NIST Dragon», разработанный в Национальном институте

* Работа выполнена в рамках выполнения работ по программе № 0368-2015-0013 Комплексная программа фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН № II.2 «Интеграция и развитие» и финансовой поддержке грантов РФФИ № 15-01-00513_а, 16-38-00190-мол_а.

стандартов и технологий (NIST, National Institute of Standards and Technology, USA). Краткое описание устройства представлено в [12].

Генератор обгоревших частиц использовался для изучения проникновения обгоревших частиц в вентиляционные отверстия [12], а также уязвимости элементов кровли (ориентированно-стружечная плита (ОСП), толь и черепица) [14, 15]. Авторами моделировалась конструкция плоской крыши, а также конструкция двускатной (угловой) крыши. В результате проводилась оценка вероятности воспламенения элементов кровли в зависимости от количества и размера частиц, а также конструкции крыши.

Поскольку ветер играет важнейшую роль в распространении WUI-пожаров в США и городских пожаров в Японии, NIST установил сотрудничество со строительным научно-исследовательским институтом (BRI) в Японии, обладающим одной из немногих крупномасштабных аэродинамических труб в мире, предназначенной специально для экспериментальных пожаров – аэродинамическая труба для исследования пожаров (FRWTF). Взаимодействие генератора обгоревших частиц NIST и FRWTF в BRI привело к прогрессу в оценке уязвимости построек при воздействии на них горящими и тлеющими частицами [13].

В дальнейшем для проведения экспериментов в лабораторных условиях установка была модернизирована в установку под названием Baby Dragon (Генератор горящих частиц в уменьшенном масштабе) [16]. Также для исследования аэродинамических характеристик частиц, образующихся во время природных пожаров, в Национальном институте стандартов и технологий создана установка «Dragon's LAIR», которая позволяет исследовать вертикальный перенос частиц и воспламенение различных конструкций под их воздействием. Комплекс «Dragon's LAIR» состоит из генератора горящих частиц (Baby Dragon) и уменьшенной в масштабе аэродинамической трубы.

После успешных испытаний в лабораторных условиях лабораторного комплекса «Dragon's LAIR» был создан усовершенствованный экспериментальный аппарат под названием «NIST continuous feed Dragon». Он является первым и единственным экспериментальным аппаратом, позволяющим непрерывно генерировать под воздействием воздушного потока горящие частицы, которые могут быть направлены на полномасштабные строительные конструкции [17].

Помимо США в Португалии на основе конструкции «NIST Dragon» [12] был разработан генератор горящих частиц «Firebrand Generator Device» [18]. Отличие предлагаемого устройства заключается в способе загрузки горючего материала, моделирующего горящие и тлеющие частицы. Загрузка производится сбоку прибора в специально выведенную воронку.

Следует отметить, что характерным недостатком всех представленных устройств является отсутствие в конструктивном исполнении возможности длительной непрерывной подачи горючего материала. Известно [19], что при реальных пожарах на природно-урбанизированной территории такое явление, как «огненный дождь», представляющий собой падающие горящие и тлеющие частицы, может продолжаться несколько часов.

Экспериментальная установка

В 2015 г. в Институте оптики атмосферы СО РАН по техническому заданию ТГУ была сконструирована и изготовлена уникальная установка для генерации горящих и тлеющих частиц различного вида, размера, скорости и формы, фотография которой представлена на рис. 1.

Разработанный авторами генератор горящих частиц (ГГЧ) имеет ряд отличительных особенностей, для длительной непрерывной подачи горючего материала установлен шнековый механизм подачи горючего материала с воздушной противо-дымовой завесой. Установка состоит из трёх сборных частей, что легко позволяет изменять характеристики конструкции под разные задачи. В конструкции ГГЧ предусмотрен ряд окон и отверстий для измерений температуры и тепловых потоков, топка ГГЧ изнутри обмазана высокотемпературным теплозащитным составом. В комплекс ГГЧ входит блок измерений температур до 1000 °С и тепловых потоков, а в качестве регистрирующей аппаратуры треков горящих частиц используется видеокамера и быстродействующая ИК-камера исследовательского класса JADE J530SB, в том числе и для измерения температуры движущихся частиц.

Основные технические данные установки:

1. Управление скорости воздушного потока и увлекаемых потоком горящих частиц осуществляется в пределах 1–10 м/с при помощи регулировки напряжения питания основного вентилятора.
2. Максимальная дальность вылета горящих частиц 5–10 м.

3. Максимальная температура частиц до 700 °С.
4. Внутренняя поверхность горна выполнена с нанесением теплозащитного покрытия.
5. Установка выполнена в мобильном исполнении, имеет колеса для перемещения.
6. Мощность потребления электрической энергии 200 Вт, напряжением 220 В.

В состав установки входит (рис. 1): приёмный бункер 1 для загрузки образцов исследуемого горючего материала. Объем бункера составляет 10 л. Шнековый механизм 2 подачи горючего материала в горн. Привод шнека через редуктор электрическим двигателем либо вручную за колесо привода. Горн 3, по которому осуществляется движение частиц под воздействием воздушного потока, их зажигание и генерация в окружающую среду. Электрический силовой шкаф 4, обеспечивающий распределение электроэнергии и защиту установки от перегрузок и коротких замыканий. Для подачи потока воздуха в канал горения используется канальный вентилятор TUBE 250XL 5 с максимальной производительностью 1100 м³/ч. Скорость подачи воздуха определяется величиной подаваемого напряжения на электромотор вентилятора через симисторный регулятор напряжения или через ЛАТР. Контрольные измерения скорости воздушного потока проводились с помощью анемометра фирмы «KURZ».

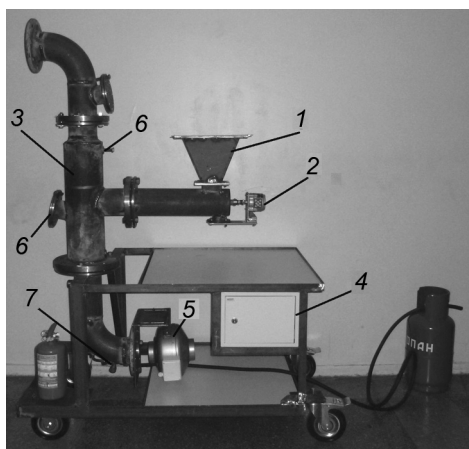


Рис. 1. Общий вид установки для генерации горящих и тлеющих частиц: 1 – приемный бункер; 2 – шнековый механизм подачи частиц; 3 – рабочая зона горна; 4 – электрический силовой шкаф; 5 – канальный вентилятор TUBE 250XL; 6 – измерительные окна

Измерение температуры горючей смеси производится в одном из трех отверстий 6, расположенных по длине горна. Измерение тепловых потоков производится через специальные люки в двух местах горна. Кроме того, в состав установки входит система подачи горючей смеси в горн с регулировкой подачи горючего газа и подачи воздуха.

Конструктивное исполнение установки для генерации горящих и тлеющих частиц позволяет использовать блок измерений температур до 1000 °С с выносной термопарой и блок измерений величины тепловых потоков с выносным датчиком, которые выполнены в одном корпусе со стандартным креплением на ДИН-рейку.

Фотография датчиков и измерительного блока представлена на рис. 2.

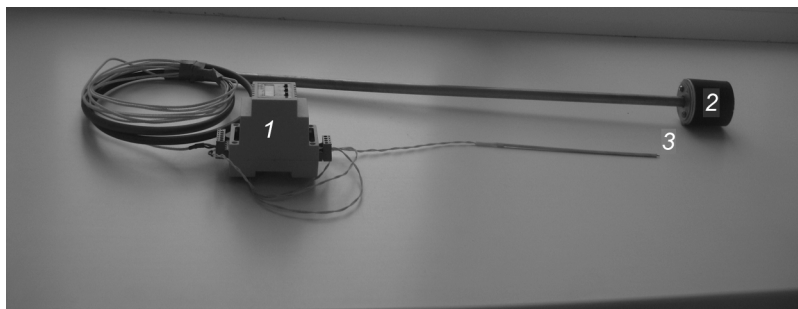


Рис. 2. Измерительный блок 1 с возможностью подключения датчиков температуры 3 и тепловых потоков 2

В качестве теплового источника используется ручная газо-воздушная горелка инжекторного типа (ГВМ-16), а для поджига газо-воздушной смеси – газовая зажигалка типа ХНГ360 с пьезо-элементом. Регулировка скорости и объём подачи газа осуществляются с помощью вентиля редуктора, установленного на баллоне с газом, и рычажного клапана на горелке, предусмотренного конструкцией, давление газа пропан-бутана 0.1–0.2 МПа, максимальный расход газа 1.0 м³/ч.

Вид и характеристики частиц, подготовленных для сжигания в ГГЧ

В качестве имитаторов горящих частиц часто используется свежесобранная кора сосны с характерными линейными размерами $L = (10, 15; 20, 25, 30) \cdot 10^{-3}$ м и толщиной $h = (4-5) \cdot 10^{-3}$ м, фрагменты веточек сосны и других хвойных деревьев, опад хвои кедра и сосны, различная древесная мульча. Размеры частиц и их древесный вид выбираются на основе поставленной задачи и данных, полученных в ходе натурных экспериментов [20, 21]. Важной характеристикой, способствующей зажиганию и переносу частиц с пламенем, является их влагосодержание и масса.

Определение дальности траекторий и других параметров горящих частиц

Одной из важных характеристик горящих частиц, образующихся во время природных пожаров, является дальность переноса, а также их траектории полета. Использование ИК-камеры совместно с данной установкой позволяет успешно определить траектории горящих частиц, их температуру, а также при использовании тепловых реперов в поле зрения ИК-камеры может служить дополнительным инструментом при определении дальности переноса и размеров частиц. При определении дальности переноса и статистического разброса частиц по исследуемой поверхности используются также многоячеистые кюветы, наполненные водой и прикрытые сверху тонким полиэтиленом.

Отработка режимов работы генератора горящих и тлеющих частиц в зависимости от входных параметров и внешних условий осуществлялась в полунатурных условиях на площадке Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН.

В результате испытаний на установке отмечено, что горящие частицы коры сосны, а также веточек сосны летят на расстояние 5–10 м в зависимости от скорости набегающего воздушного потока.

Выводы

Таким образом, применение генераторов горящих частиц позволяет упростить и удешевить процесс изучения воздействия природных пожаров на распространение и перенос степных и низовых лесных пожаров, а также определить стойкость строительных и защитных материалов к огневому воздействию и типу противопожарного обустройства кровли и других элементов строительных ограждающих конструкций.

Использование ИК-камеры совместно с данной установкой при наличии тепловых реперов в поле зрения ИК-камеры позволяет успешно определить траектории горящих частиц, их размеры, температуру и дальность переноса.

Применение многоячеистых кювет, наполненных водой и прикрытых сверху тонким полиэтиленом, позволяет провести расчёт статистического разброса параметров частиц по исследуемой поверхности и даже определить потерю веса в процессе горения и переноса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen J. D. // J. Forestry. – 2000. – V. 98. – No. 3. – P. 15–21.
2. Mell W. E., Manzello S. L., Maranghides A., et al. // Int. J. Wildland Fire. – 2010. – V. 19. – P. 238–251.
3. Manzello S. L., Cleary T. G., Shields J. R., et al. // Fire Safety J. – 2008. – V. 43. – No. 3. – P. 226–233.
4. Yin P., Liu N., Chen H., et al. // Fire Technol. – 2014. – V. 50. – No. 1. – P. 79–91.
5. Manzello S. L. and Suzuki S. // Fire and Mater. – 2012. – V. 36. – No. 8. – P. 623–635.
6. Manzello S. L., Maranghides A., Shields J. R., et al. // Fire and Mater. – 2009. – V. 33. – No. 1. – P. 21–31.
7. Albin F. A. // Gen. Tech. Rep. INT-56, USDA Forest Service. – 1979. – P. 73.
8. Tarifa C. S., del Notario P. P., and Moreno F. G. // Symp. (Int.) on Combustion. – 1965. – V. 10. – P. 1021–1037.
9. Tse S. D. and Fernandez-Pello A. C. // Fire Safety J. – 1998. – V. 30. – No. 4. – P. 333–356.

10. Albin F. A. // Combust. Sci. Technol. – 1983. – V. 32. – No. 5–6. – P. 277–288.
11. Manzello S. L., Park S., and Cleary T. G. // Fire Safety J. – 2009. – V. 44. – No. 6. – P. 894–900.
12. Manzello S. L., Shields J. R., Yang J. C., et al. // 11th Int. Conf. Fire Science and Engineering (INTERFLAM), 3–5 September 2007, London, UK (Interscience Communications Ltd: London).
13. Manzello S. L., Shields J. R., Cleary T. G., et al. // Fire Safety J. – 2008. – V. 43. – No. 4. – P. 258–268.
14. Manzello S. L., Shields J. R., Hayashi Y., and Nii D. // Fire Safety Sci. PNIS. – 2008. – V. 9. – P. 143–154.
15. Manzello S. L., Hayashi Y., Yoneki T., and Yamamoto Y. // Proc. Eleventh Int. Conf. Fire and Materials. – 2009. – P. 267–276.
16. Manzello S. L., Park S.-H., Suzuki S., et al. // Fire Safety J. – 2011. – V. 46. – No. 8. – P. 568–578.
17. Manzello S. L. and Suzuki S. // Procedia Engineering. – 2013. – V. 62. – P. 91–102.
18. Oliveira R., Quesada C., Viegas D. X., et al. // Adv. Forest Fire Res. – 2014. – P. 759–765.
19. Mell W. E., Manzello S. L., Maranghides A., et al. // Int. J. Wildland Fire. – 2010. – V. 19. – P. 238–251.
20. Grishin A. M., Filkov A. I., Loboda E. L., et al. // Int. J. Wildland Fire. – 2014. – V. 23. – P. 445–449.
21. Filkov A. I., Prohanov S. A., Mueller E., et al. // Proc. Combustion Institute. – 2017. – V. 36. – No. 2. – P. 3263–3270.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 12.10.17.

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

³ University of Melbourne, School of Ecosystem and Forest Sciences,
Melbourne, Australia

Касымов Денис Петрович, к.ф.-м.н., зав. учебной лабораторией, e-mail: denkasymov@gmail.com;

Перминов Владислав Валерьевич, магистрант;

Рейно Владимир Владимирович, ст. науч. сотр.;

Фильков Александр Иванович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;

Лобода Егор Леонидович, д.ф.-м.н., зав. кафедрой.

D.P. KASYMOV¹, V.V. PERMINOV¹, V.V. REYNO², A.I. FILKOV^{1,3}, E.L. LOBODA¹

AN EXPERIMENTAL APPARATUS FOR FIREBRAND GENERATION APPLIED TO WILDLAND FIRE SPREAD

An experimental apparatus for firebrand generation applied to studying wildland-urban interface fires (WUI fires) is provided in this paper. The brief description of the experimental apparatus, the method of carrying out the research are given. As a result of a series of full scale experiments on a developed unit for the generation of burning and smoldering particles, it was established that burning particles of the pine bark and pine branches are transported over a distance of 5–10 meters, depending on the speed of the incoming air flow. This range allows to conduct full scale experiments on the effects of burning particles on the surface litter, in addition to simulate the conditions for the exposure of burning particles formed in the front of the fire on structural materials (fence, walls and roofs).

Keywords: *wildland fire, experimental apparatus, firebrands, surface litter.*

REFERENCES

1. Cohen J.D. Preventing disaster: home ignitability in the wildland-urban interface. *Journal of Forestry*, 2000, vol. 98, no. 3, pp. 15–21.
2. Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., Butry D., and Rehm G.R. The wildland-urban interface fire problem – current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, vol. 19, pp. 238–251.
3. Manzello S.L., Cleary T.G., Shields J.R., Maranghides A., Mell W., and Yang J.C. Experimental investigation of firebrands: Generation and ignition of fuel beds. *Fire Safety Journal*, 2008, vol. 43, no. 3, pp. 226–233.
4. Yin P., Liu N., Chen H., Lozano J.S., and Shan Y. New correlation between ignition time and moisture content for pine needles attacked by firebrands. *Fire Technology*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 79–91.
5. Manzello S.L. and Suzuki S. The new and improved NIST dragon's LAIR (lofting and ignition research) facility. *Fire and Materials*, 2012, vol. 36, no. 8, pp. 623–635.
6. Manzello S.L., Maranghides A., Shields J.R., Mell W.E., Hayashi Y., and Nii D. Mass and size distribution of firebrands generated from burning korean pine (pinus koraiensis) trees. *Fire and Materials*, 2009, vol. 33, no. 1, pp. 21–31.
7. Albini F.A. Spot fire distance from burning trees- a predictive model. *Gen. Tech. Rep. INT-56, USDA Forest Service*, 1979, p. 73.
8. Tarifa C.S., del Notario P.P., and Moreno F.G. On the flight paths and lifetimes of burning particles of wood. *Symposium (Int.) on Combustion*, 1965, vol. 10, pp. 1021–1037.
9. Tse S.D. and Fernandez-Pello A.C. On the flight paths of metal particles and embers generated by power lines in high winds - a potential source of wildland fires. *Fire Safety Journal*, 1998, vol. 30, no. 4, pp. 333–356.
10. Albini F.A. Transport of firebrands by line thermals. *Combust. Sci. Technol.*, 1983, vol. 32, no. 5–6, pp. 277–288.
11. Manzello S.L., Park S., and Cleary T.G. Investigation on the ability of glowing firebrands deposited within crevices to ignite common building materials. *Fire Safety Journal*, 2009, vol. 44, no. 6, pp. 894–900.
12. Manzello S.L., Shields J.R., Yang J.C., Hayashi Y., and Nii D. On the use of a firebrand generator to investigate the ignition of structures in wildland-urban interface (WUI) fires. *11th International Conference on Fire Science and Engineering (INTERFLAM)*, 2007, London, UK. (Interscience Communications Ltd: London).
13. Manzello S.L., Shields J.R., Cleary T.G., Maranghides A., Mell W.E., et al. On the development and characterization of a firebrand generator. *Fire Safety Journal*, 2008, vol. 43, no. 4, pp. 258–268.
14. Manzello S.L., Shields J.R., Hayashi Y., and Nii D. Investigating the vulnerabilities of structures to ignition from a firebrand attack. *Fire Safety Science – Proceedings of the Ninth International Symposium*, 2008, vol. 9, pp. 143–154.
15. Manzello S.L., Hayashi Y., Yoneki T., and Yamamoto Y. Firebrand attack on ceramic tile roofing assemblies. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Fire and Materials*, 2009, pp. 267–276.
16. Manzello S.L., Park S-H, Suzuki S., et al. Experimental investigation of structure vulnerabilities to firebrand showers. *Fire Safety Journal*, 2011, vol. 46, no. 8, pp. 568–578.
17. Manzello S.L. and Suzuki S. Experimentally Simulating Wind Driven Firebrand Showers in Wildland-urban Interface (WUI) Fires: Overview of the NIST Firebrand Generator (NIST Dragon) Technology. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 62, pp. 91–102.
18. Oliveira R., Quesada C., Viegas D.X., Freitas E., and Raposo J. Firebrand generator system applied to wildland-urban interface research. *Advances in Forest Fire Research*, 2014, pp. 759–765.
19. Mell W.E., Manzello S.L., Maranghides A., Butry D., and Rehm R.G. The wildland-urban interface fire problem – current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*, 2010, vol. 19, pp. 238–251.
20. Grishin A.M., Filkov A.I., Loboda E.L., Reyno V.V., Kozlov A.V., Kuznetsov V.T., Kasymov D.P., Andreyuk S.M., and Ivanov A.I. A Field Experiment on Grass Fire Effects on Wooden Constructions and Peat Layer Ignition. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, vol. 23, pp. 445–449.
21. Filkov A.I., Prohanov S.A., Mueller E., Kasymov D.P., Martynov P., Houssami M., Thomas J.C., Skowronski N., Butler B., Gallagher M.R., Clark K., Mell W., Kremens R., Hadden R.M., and Simeoni A. Investigation of firebrand production during prescribed fires conducted in a pine forest. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, no. 2, pp. 3263–3270.

¹ National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia

³ University of Melbourne, School of Ecosystem and Forest Sciences, Melbourne, Australia

Kasymov Denis Petrovich, Ph.D., Head of the Laboratory, e-mail: denkasymov@gmail.com;

Perminov Vladislav Valer'evich, Master Student;

Reyno Vladimir Vladimirovich, Ph.D., Senior Researcher;

Filkov Alexander Ivanovich, Ph.D., Senior Researcher;

Loboda Egor Leonidovich, Dr.Sc. (Phys.-Math.), Head of the Department.