

Технологии противодействия техногенным угрозам

Научная статья
УДК 623.746.-519
doi: 10.17223/29491665/9/5

Научный задел и потенциал Томского государственного университета для развития новой отрасли беспилотных авиационных систем

Дмитрий Вадимович Шашев¹, Юлия Николаевна Рыжих², Александр Анатольевич Ерофеев³,

Станислав Викторович Шидловский⁴, Наталья Владимировна Нестерова⁵,

Кирилл Владимирович Костюшин⁶, Адиль Аскеров⁷, Анастасия Владимировна Червакова⁸,

Владимир Афанасьевич Архипов⁹, Сергей Александрович Басалаев¹⁰,

Антон Михайлович Булавко¹¹, Ксения Григорьевна Перфильева¹², Сергей Михайлович Федоров¹³,

Александр Витальевич Юстус¹⁴, Куат Исмаилов¹⁵, Сергей Эдуардович Шипилов¹⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16} Томский государственный университет, Томск, Россия

^{7, 8} ООО «Облачный вычислительный центр», Томск, Россия

¹¹ ГУ МЧС России по Томской области, Томск, Россия

¹ dshashев@mail.ru

² jula@stf.tsu.ru

³ erofeew@yandex.ru

⁴ shidlovskiy@yandex.ru

⁵ nesterovav@mail.tsu.ru

⁶ kostushink@hotmail.com

⁷ askerov121099@gmail.com

⁸ ch-nastyat1997@mail.ru

⁹ leva@niipmm.tsu.ru

¹⁰ tarm@niipmm.tsu.ru

¹² k.g.perfiljeva@yandex.ru

¹⁴ yustus2130990@mail.ru

¹⁵ mendikjan@gmail.com

¹⁶ shipilov@mail.tsu.ru

Аннотация. Данная статья носит научно-популярный и информационный характер, освещая текущие разработки и задел Томского государственного университета в области беспилотных авиационных систем (БАС). В статье представлены актуальные научные направления и тренды технологий БАС, описаны результаты работ научных коллективов, а также продемонстрирована значимость системного подхода и связи научных направлений с подготовкой высококвалифицированных кадров.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, БАС, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, проектирование, система технического зрения, аэродинамика, дистанционное зондирование, автоматизированное проектирование, подготовка специалистов

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030), а также за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00307-П, <https://rscf.ru/project/22-19-00307/>.

Для цитирования: Шашев Д.В., Рыжих Ю.Н., Ерофеев А.А., Шидловский С.В., Нестерова Н.В., Костюшин К.В., Аскеров А., Червакова А.В., Архипов В.А., Басалаев С.А., Булавко А.М., Перфильева К.Г., Федоров С.М., Юстус А.В., Исмаилов К., Шипилов С.Э. Научный задел и потенциал Томского государственного университета для развития новой отрасли беспилотных авиационных систем // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 44–60. doi: 10.17223/29491665/9/5

Original article
doi: 10.17223/29491665/9/5

The scientific reserve and potential of Tomsk State University for the development of a new industry of unmanned aircraft systems

Dmitriy V. Shashev¹, Yulia N. Ryzhikh², Alexander A. Yerofeyev³, Stanislav V. Shidlovskiy⁴, Natalia V. Nesterova⁵, Kirill V. Kostyushin⁶, Adil Askerov⁷, Anastasia V. Chervakova⁸, Vladimir A. Arkhipov⁹, Sergey A. Basalaev¹⁰, Anton M. Bulavko¹¹, Ksenia G. Perfilieva¹², Sergey M. Fedorov¹³, Alexander V. Justus¹⁴, Kuat Ismailov¹⁵, Sergey E. Shipilov¹⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{7, 8} Cloud Computing Center LLC, Tomsk, Russian Federation

¹¹ Ministry of Emergency Situations of Russia for the Tomsk region, Tomsk, Russian Federation

¹ dshashev@mail.ru

² jula@sf.tsu.ru

³ erofeev@yandex.ru

⁴ shidlovskiy@mail.ru

⁵ nesterovanv@mail.tsu.ru

⁶ kostushink@hotmail.com

⁷ askerov121099@gmail.com

⁸ ch-nastyat1997@mail.ru

⁹ leva@niipmm.tsu.ru

¹⁰ tarm@niipmm.tsu.ru

¹² k.g.perfiljeva@yandex.ru

¹⁴ yustus2130990@mail.ru

¹⁵ mendikjan@gmail.com

¹⁶ shipilov@mail.tsu.ru

Abstract. This article is a popular-science and informational piece that highlights the current developments and research efforts of Tomsk State University in the field of unmanned aircraft systems (UAS). It presents current scientific directions and technological trends in UAS, describes the results achieved by research teams, and demonstrates the importance of a systematic approach as well as the integration of scientific research with the training of highly qualified specialists.

Keywords: unmanned aircraft systems, UAS, unmanned aerial vehicles, UAVs, engineering, vision system, aerodynamics, remote sensing, computer-aided design, specialist training

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030), and the Russian Science Foundation № 22-19-00307-П, <https://rscf.ru/en/project/22-19-00307/>.

For citation: Shashev, D.V., Ryzhikh, Yu.N., Yerofeyev, A.A., Shidlovskiy, S.V., Nesterova, N.V., Kostyushin, K.V., Askerov, A., Chervakova, A.V., Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Bulavko, A.M., Perfilieva, K.G., Fedorov, S.M., Justus, A.V., Ismailov, K. & Shipilov, S.E. (2025) The scientific reserve and potential of Tomsk State University for the development of a new industry of unmanned aircraft systems. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 44–60. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/5

Распоряжением Правительства РФ от 21 июня 2023 г. № 1630-р утверждена Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 г. и на перспективу до 2035 г., в соответствии с которой в течение ближайших 6,5 лет в стране должна появиться новая отрасль экономики, связанная с созданием и использованием гражданских беспилотников. Действие Стратегии распространяется на области разработки, производства и безопасной эксплуатации беспилотных авиационных систем (БАС), услуги, предоставляемые с применением БАС, развитие сквозных технологий и сервисов, развитие системы обучения и подготовки кадров, развитие безопасной инфраструктуры и создание научно-технического задела, необходимого для формирования и развития отрасли беспилотной авиации.

В соответствии с положениями Стратегии в настоящее время в России идет процесс формирования системы подготовки специалистов в сфере БАС, формируется единое научно-образовательное пространство для подготовки специалистов в сфере БАС, вузы имеют право разрабатывать гибкие образовательные программы в соответствии с запросами рынка труда и готовить специалистов, обладающих достаточными компетенциями для работы в данной сфере.

Министерством промышленности и торговли РФ реализуется федеральный проект «Разработка, стандартизация и серийное производство беспилотных авиационных систем и их комплектующих». В рамках этого проекта в Томской области создан Научно-производственный центр БАС который включает в себя:

- лётно-испытательный комплекс с сертификационным центром БАС;
- научно-образовательный комплекс с авиационным учебным центром и центром оценки квалификаций;
- лабораторно-исследовательский комплекс с ситуационным центром и центром стендовых испытаний;
- центр коллективного пользования с оборудованием для макетирования, прототипирования, реверс-инжиниринга и малосерийного производства БАС.

Министерством науки и высшего образования РФ реализуется федеральный проект «Кадры для БАС», в рамках которого запланировано, что в 2024 г. 5 тысяч, а в 2025 г. около 40 тысяч специалистов будут проходить обучение в сфере беспилотных авиационных систем (БАС), а к 2030 г. беспилотная отрасль будет включать не менее 1 млн человек.

В свою очередь Томской государственный университет как один из лидирующих научно-образовательных центров нашей страны предпринимает усилия и реализует решения для ответов на поставленные перед государством вызовы, стремясь к обеспечению технологического лидерства.

Направления научных и прикладных разработок в области БАС

В Томском государственном университете с 2015 г. активно ведутся разработки в области БАС в широком компетентностном поле, в том числе при тесном взаимодействии с промышленными партнерами, включая:

1. Проектирование, цифровые двойники (рис. 1):

- автоматическая генерация геометрии крыла, корпуса, оперения и других элементов;
- оптимизация аэродинамики и корпуса БПЛА аналитическими, градиентными и генетическими алгоритмами;
- использование открытых и расширение собственных баз данных о бортовом радиоэлектронном оборудовании БПЛА для их подбора и эффективного проектирования БПЛА в целом;
- применение и разработка искусственных нейронных сетей для систем предиктивной аналитики.

2. Сборка БАС, разработка компонентов, полезных нагрузок:

- разработка системы дополненной реальности для сборки БПЛА мультироторного типа;
- разработка систем технического зрения для автономной навигации;
- разработка и сборка БАС мультироторного типа, самолетного типа, типа «конвертоплан»;

- производство микроэлектронной элементной базы для СВЧ-диапазона и силовой электроники;
- разработка радиолокационных систем.

3. Программирование и разработка материалов:

- обширная база экспериментальных данных характеристик композиционных материалов;
- проектирование новых композиционных материалов;
- оптимизация и проектирование легких и прочных корпусов БПЛА;
- создание композиционных материалов с заданными характеристиками.

4. Обработка данных с БАС:

- алгоритмы на базе технологий искусственного интеллекта для обработки данных с БПЛА;
- сбор и обработка больших данных;
- технологии дистанционного зондирования и фотограмметрической обработки данных с БПЛА.

5. Интеллектуальные системы управления БАС (рис. 2):

- алгоритмы искусственного интеллекта для управления;
- автономные БАС;
- групповое управление.

Научные проекты в области БАС

Ниже представлено освещение некоторых результатов научных проектов, реализованных (или реализуемых в настоящее время) в ТГУ в области БАС.

1. Применение беспилотной авиационной системы ВТ-30Е в геодезическом мониторинге и картографировании деформаций автодороги Надым-Салехард.

В 2024 г. в Ямalo-Ненецком автономном округе был проведен комплекс работ по исследованию современного состояния и картографированию деформаций автодороги Надым – Салехард с применением съёмочной аппаратуры, установленной на беспилотном воздушном судне вертолётного типа «ВТ-30Е» (изготовитель АО «НПП «Радар ммс»). Воздушное лазерное сканирование при помощи лазерного сканера АГМ-МС 3 (версия 2.0) было проведено на 10 участках автодороги общей протяжённостью 143 км (рис. 3). Относительная высота (AGL) проведения работ составляла 100 м, а скорость полёта БВС 12–15 м/с. Съёмочные работы проводились в соответствии с ГОСТ Р 59562–2021.

На 15 ключевых участках была организована система планово-высотных статических геодезических наблюдений реперных знаков, расположенных на поверхности автодороги, с использованием ГНСС-аппаратуры. При последующем уравнивании средняя ошибка определения планового положения составила 8 мм, а высотного – 15 мм.



Рис. 1. Результаты проектирования БАС

Fig. 1. UAS Design Results



Рис. 2. Результаты разработки автономных БАС

Fig. 2. Results of development of autonomous UAS

В специализированном программном обеспечении проведены подготовка облаков точек лазерного сканирования и их классификация на различные типы поверхностей (грунт, растительность, антропогенные объекты и др.). На основе полученных данных построены подробные ортофотопланы и цифровые модели рельефа автодороги и прилегающих территорий.

На ключевых участках исследования выполнен геоморфологический анализ рельефа с выявлением ведущих факторов, вызывающих деформацию дорожного полотна (рис. 4). Полученные данные позволили сделать первые выводы о региональных различиях во вкладе физико-географических и гео-

лого-геоморфологических факторов в устойчивость наиболее проблемных участков автодороги Надым – Салехард.

Дальнейшее проведение работ позволит определить классы земной поверхности, отражающие разную интенсивность проявления термоденудационных процессов. Помимо этого, планируется провести разделение поверхности с наличием деформаций методами управляемой классификации, оценить точность моделей машинного обучения, а также рассчитать индексы топографической позиции (TPI) для определения площадного распространения выделенных классов земной поверхности в областях положительных и отрицательных значений индекса.

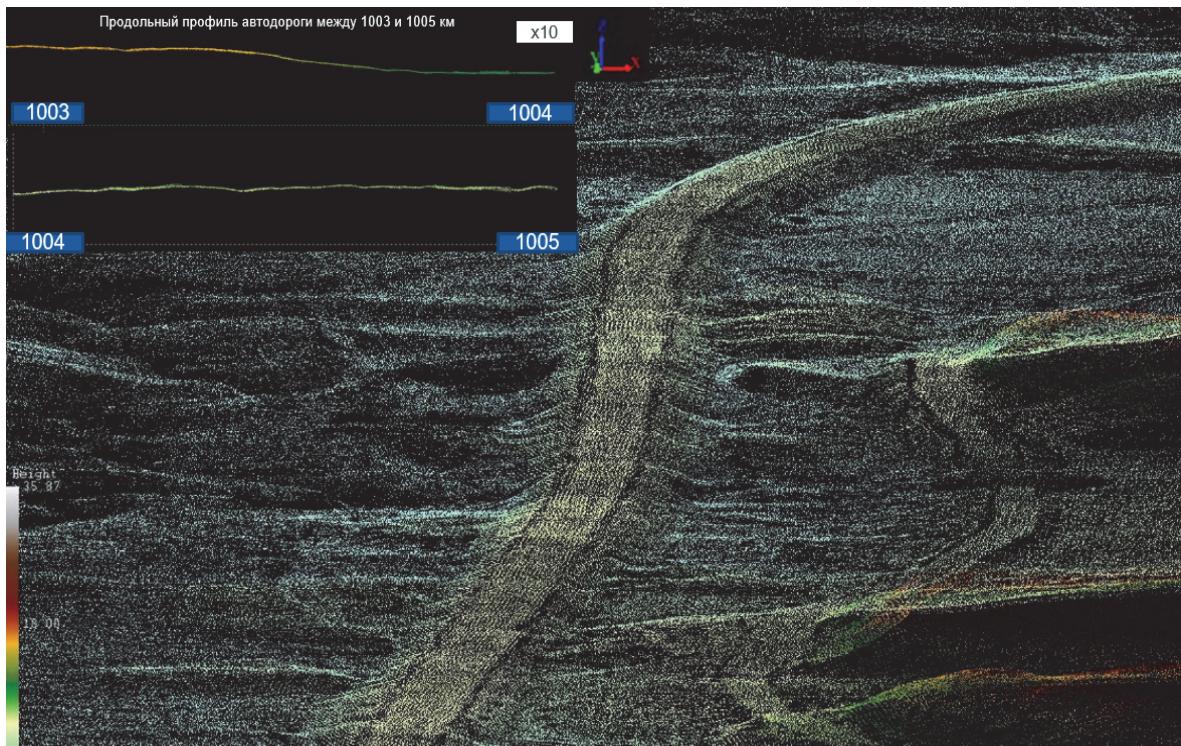


Рис. 3. Фрагмент облака точек класса «земля» участка исследований № 1

Fig. 3. The fragment of the cloud of ground class points of study area No. 1

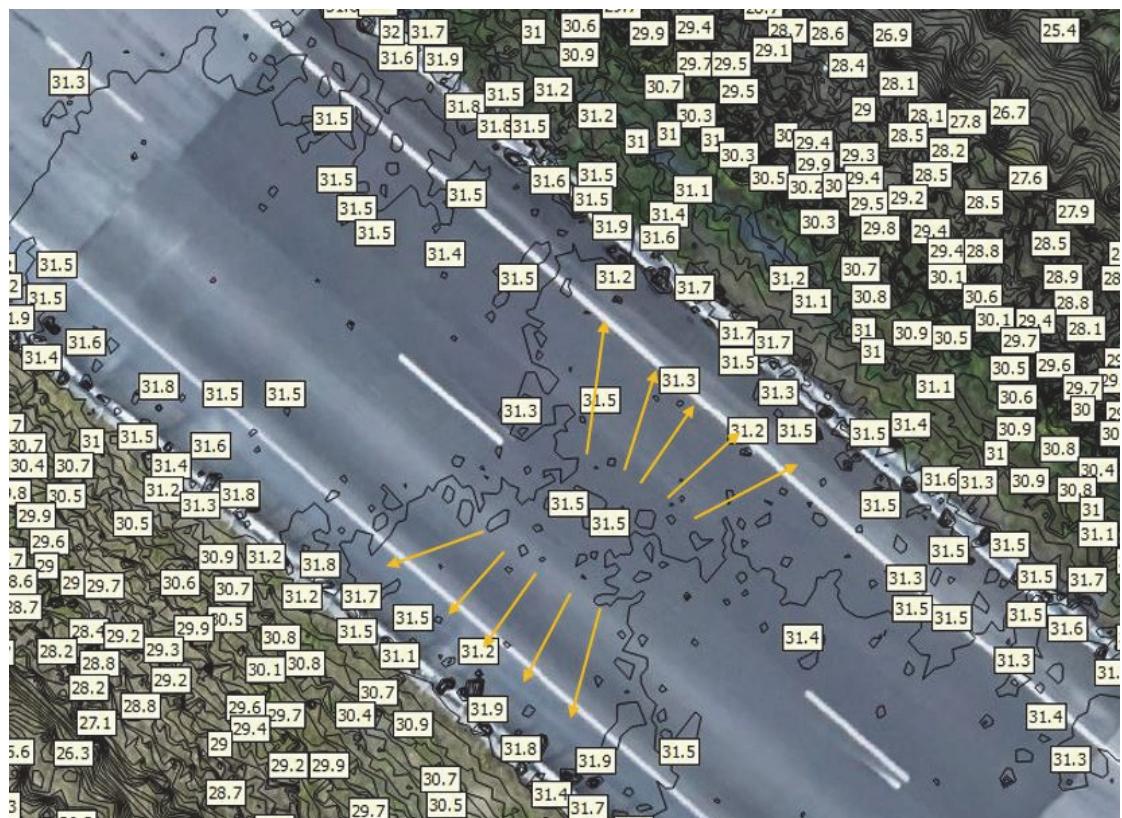


Рис. 4. Применение данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки для анализа степени деформации дорожного покрытия (участок автодороги Надым – Салехард на 1014-м км + 82 м) (желтыми стрелками показаны векторы деформаций)

Fig. 4. The application of aerial laser scanning and aerial photography data for analysis of the degree of deformation of the road surface (section of the Nadym-Salekhard highway at 1014 km + 82 m) (deformation vectors are shown with yellow arrows)

2. Облачная платформа CloudCFD для моделирования газодинамических, гидродинамических и тепловых процессов.

Современные инженеры сталкиваются с рядом сложностей при разработке и оптимизации беспилотных авиационных систем. Традиционные методы численного моделирования требуют значительных вычислительных ресурсов, дорогостоящего программного обеспечения и высокой квалификации пользователей. Это создает барьеры для малых и средних предприятий, которые не могут позволить себе покупку лицензий на проприетарное ПО и содержание дорогостоящей вычислительной инфраструктуры. Кроме того, многие существующие решения ограничены в масштабируемости и кроссплатформенной совместимости, что замедляет процесс проектирования и увеличивает время вывода продукта на рынок. В условиях растущей конкуренции и жестких сроков такие издержки становятся неприемлемыми.

Для сокращения таких издержек командой проекта разработана облачная платформа CloudCFD [1], предназначенная для моделирования газодинамических и тепловых процессов. С помощью разработанной платформы пользователи могут проводить расчеты обтекания воздушным потоком, оптимизировать аэродинамические характеристики и анализировать тепловые нагрузки на компоненты БПЛА. Платформа позволяет: импортировать геометрию расчетных областей в форматах: STEP, IGS, STL; проводить автоматизированное построение структурированных и неструктурных расчетных сеток; проводить расчеты течений вязкого сжимаемого и несжимаемо-

мого теплопроводного газа с использованием моделей турбулентности $k-\epsilon$, $k-\omega$, $k-\omega$ SST, LES; автоматизировать процесс формирования набора начальных данных, проведения многопараметрических расчетов, анализа и обработки результатов; визуализировать результаты расчетов и экспортить массивы расчетных данных для использования в стороннем программном обеспечении.

Платформа состоит из следующих функциональных частей:

1. *Клиент* – web-интерфейс обеспечивающий доступ к вычислительному облаку и позволяющий в интерактивном режиме подготавливать задачу, отправлять расчетную задачу на вычислительный кластер, получать и визуализировать результаты расчетов (рис. 5).

2. *Вычислительное облако* предоставляет на время решения задачи и обеспечивает взаимодействие с клиентом посредством открытого API, управляет вычислительным процессом.

Таким образом, облачная модель предоставления услуг исключает необходимость капитальных затрат на программное обеспечение и вычислительное оборудование, делая доступным использование подходов CFD моделирования даже для небольших компаний и стартапов. Помимо процессов моделирования элементов БАС, разработанная платформа позволяет решать широкий спектр газодинамических, гидродинамических и тепловых задач и может быть использована в автомобилестроении, нефтегазовой и химической промышленности, энергетике и строительстве.

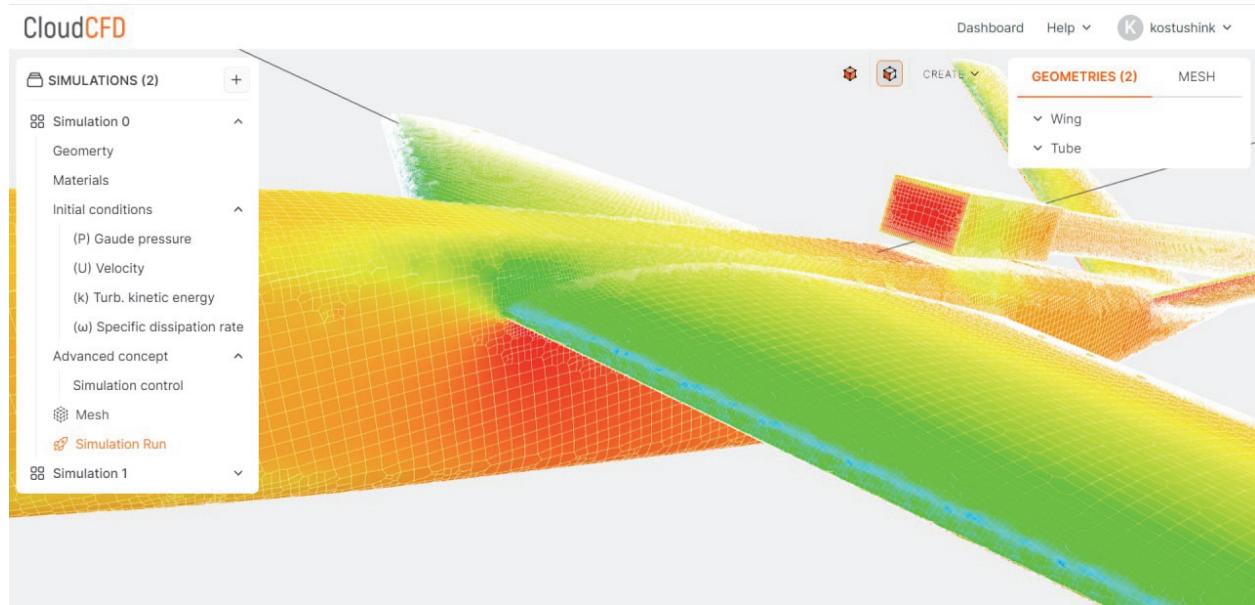


Рис. 5. Web-интерфейс облачной платформы CloudCFD

Fig. 5. CloudCFD web interface

3. Моделирование сброса хладагента при тушении пожаров. Одним из эффективных способов тушения крупных пожаров, особенно в труднодоступных районах, является сброс жидкого хладагента в очаг пожара с борта летательного аппарата. В настоящее время в РФ для этого используются вертолеты МИ-8, оснащенные водосливным устройством ВСУ-А5.

В рамках выполнения исследований под руководством профессора В.А. Архипова на базе ТГУ, поддержанных грантом РНФ № 22-19-00307, был разработан программный комплекс для оперативного расчета оптимальных параметров сброса жидкости при авиационном тушении пожаров. Комплекс позволяет: визуализировать аэронавигационные и физико-географические данные (спутниковые и аэронавигационные карты, схемы маршрутов, высоту, крутизну склонов и т. д.), сохранять координаты пожара, полетные треки, области сброса хладагента и рассчитывать оптимальные параметры сброса хладагента (рис. 6). Графический интерфейс и функциональные части программного комплекса разрабатывались с привлечением летчиков-наблюдателей МЧС России по Томской области.

Программный комплекс адаптирован для работы на базе защищенного планшетного компьютера DURABOOK R11, используемого летчиками-наблюдателями МЧС России, и протестирован на других

устройствах под управлением операционных систем Windows 10/11 и Android 13.

Основой комплекса является математическая модель [2], позволяющая рекомендовать оптимальные параметры тушения, обеспечивающие требуемую плотность орошения с учетом реальных метеоусловий. Данная модель разработана на базе большого комплекса экспериментально-теоретических исследований процесса осаждения компактного объема жидкости в усложненных условиях.

Апробация модели путем проведения натурных экспериментов, необходимая для ее практического внедрения, связана с большими материальными затратами и экономически нецелесообразна. Авторами проекта предложена методика моделирования сброса хладагента при авиационном пожаротушении с использованием беспилотного летательного аппарата, снабженного модельным водоливным устройством (рис. 7).

На основе разработанной методики проведены экспериментальные исследования по измерению пространственного распределения плотности и интенсивности орошения при сбросе хладагента (рис. 8). Показана возможность тушения ограниченного очага пожара при сбросе жидкости с беспилотного летательного аппарата (рис. 9).

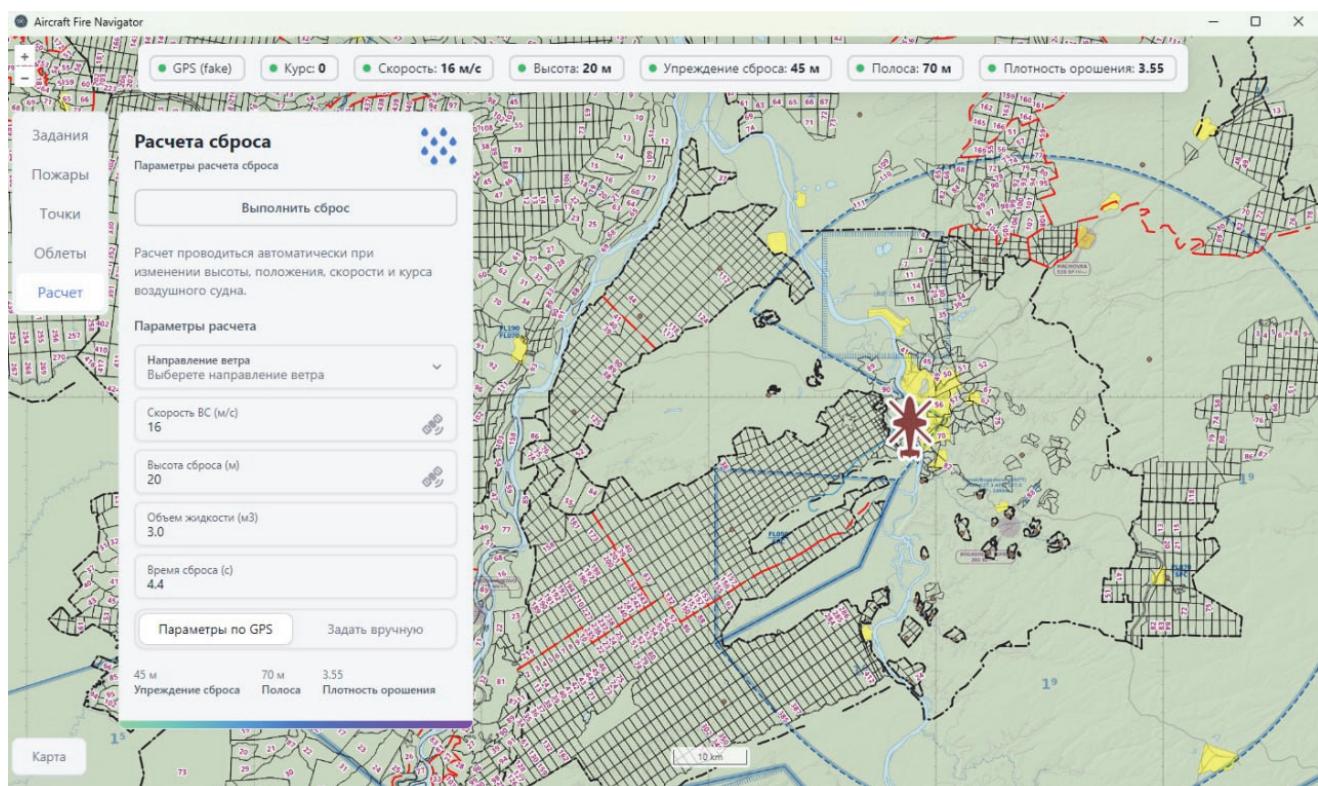


Рис. 6. Графический интерфейс программного комплекса для оперативного расчета координат сброса огнетушащей жидкости

Fig. 6. Graphical interface of the software package for online calculation of discharge coordinates, fire extinguishing fluid



Рис. 7. БПЛА, оснащенный модельным сливным устройством, и процесс сброса жидкости с высоты 10 м

Fig. 7. UAV equipped with a model drain device and the process of liquid discharge from a height of 10 m

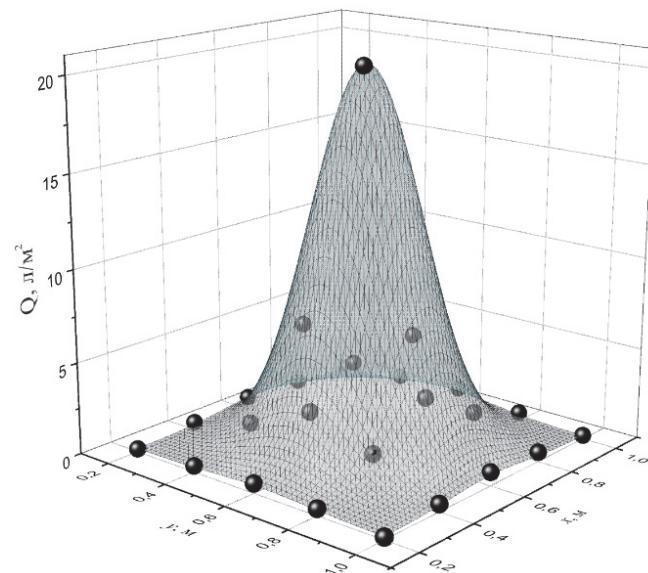


Рис. 8. Распределение плотности орошения при сбросе жидкости с БПЛА с высоты 14 м

Fig. 8. Sprinkling density distribution during liquid discharge from the UAV from a height of 14 m



Рис. 9. Видеокадры процесса тушения ограниченного очага пожара при сбросе жидкости с БПЛА (t – время)

Fig. 9. Video frames of the process of extinguishing a limited fire source when discharging liquid from a UAV (t – time)

4. Инструменты генеративного дизайна БПЛА с использованием многоуровневой оптимизации. Данный проект представляет собой разработку комплекса инструментов для автоматизированного проектирования БПЛА на основе многоуровневой оптимизации аэродинамических характеристик [3]. Разработанный подход включает последовательное применение сканирования с грубым шагом для предварительного исследования пространства параметров, генетических алгоритмов для выявления перспективных решений и градиентных методов для финальной оптимизации [4].

Ключевой особенностью системы является снижение вычислительной нагрузки за счет эффективной интеграции аналитических и инженерных методов расчета аэродинамики с более точными, но ресурсоемкими методами вычислительной гидродинамики (CFD). Инструменты были успешно апробированы при проектировании четырех различных типов БПЛА, продемонстрировав значительное превосходство над традиционными методами проектирования [5].

В ходе применения инструментов генеративного дизайна удалось рассмотреть около 700 вариантов конструкции для каждого БПЛА вместо 9 при ручном проектировании. Временные затраты составили в среднем 14 суток расчетов против 3 месяцев работы команды из 4 инженеров, что соответствует повышению эффективности процесса проектирования более чем в 25 раз [6].

5. CAD-генератор цифровой модели БПЛА. В рамках этого проекта разработан специализированный программный инструмент для автоматической генерации трехмерных цифровых моделей БПЛА на основе параметрического представления. CAD-генератор обеспечивает создание полной цифровой модели летательного аппарата по заданному набору параметров, что является необходимым условием для реализации процесса автоматизированной оптимизации [7–9].

Инструмент поддерживает различные конфигурации БПЛА и обеспечивает высокую степень гибкости при описании геометрии основных компонентов: крыла, фюзеляжа, оперения и силовой установки. CAD-генератор интегрирован с системами инженерного анализа, что позволяет автоматизировать процесс «параметры → 3D-модель → расчет → оценка → новые параметры», критически важный для реализации итеративных процессов оптимизации.

6. Технологии проектирования изделий из полимерных композитов. Проект посвящен освоению и развитию технологий проектирования и производства компонентов БПЛА из современных полимерных композиционных материалов, включая углепла-

стик, стеклопластик, арамид и т.д. Разработаны методики проектирования композитных конструкций с учетом специфики их механического поведения и особенностей технологических процессов изготовления.

Применение композитных материалов позволяет значительно снизить массу конструкции при сохранении или повышении прочностных характеристик, что особенно важно для БПЛА, где массовая эффективность напрямую влияет на дальность полета, полезную нагрузку и энергоэффективность. Разработанные подходы обеспечивают возможность создания сложных интегральных конструкций, не достижимых при использовании традиционных материалов.

7. Инструменты для расчета, оптимизации и подбора воздушных винтов БПЛА. Данный проект направлен на разработку специализированных программных инструментов для расчета, оптимизации и подбора воздушных винтов БПЛА с учетом специфики режимов полета и требований к энергоэффективности. Разработанные инструменты позволяют проводить детальный анализ аэродинамических характеристик воздушных винтов различной геометрии и оптимизировать их параметры для достижения максимальной эффективности в заданных условиях эксплуатации.

Система включает модули для расчета тяги, мощности и КПД воздушного винта, а также инструменты оптимизации, позволяющие подобрать оптимальную конфигурацию с учетом ограничений по диаметру, частоте вращения и доступной мощности силовой установки. Особое внимание уделено интеграции винтомоторной группы с общей аэродинамической компоновкой БПЛА для минимизации интерференционных эффектов и достижения максимальной системной эффективности.

Представленные проекты в совокупности формируют комплексный подход к проектированию высокоеффективных БПЛА, обеспечивая значительное сокращение времени разработки и повышение качества конечного продукта.

8. СВЧ Георадар и нелинейный локатор. Георадары, или грунтопроникающие радары (Ground Penetrating Radar, GPR), являются мощным инструментом для исследования подповерхностных структур. Они активно применяются в геологии, археологии, строительстве, военной, гуманитарной сфере и при поисково-спасательных операциях. В последние годы использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в сочетании с георадарами открыло новые возможности для сканирования как опасных, так и безопасных пространств. В частности, для задачи гуманитарного разминирования особый интерес

представляет применение устройств локации нелинейных (полупроводниковых) элементов, которые позволяют обнаруживать электронные устройства, скрытые в грунте или других средах.

Среди многообразия устройств георадиотомографии и нелинейной локации вниманию предлагаются устройства СВЧ георадара и нелинейного локатора, разработанных на базе РФФ ТГУ.

СВЧ георадар представляет собой модульный комплекс, состоящий из блока формирования и приема ВЧ импульсов на основе ЛЧМ генератора (с частотным диапазоном 0,5–3 ГГц) и модуля антенной решетки (рис. 10). Кроме блока ЛЧМ генератора ВЧ импульсов и антенных модулей (антенная решетка с синтезированной апертурой), в состав аппаратуры

также входят навигационный блок и управляющий компьютер.

Благодаря применению антенных решеток с синтезированием апертуры обеспечивается возможность получать помимо стандартных радарограмм с каждого канала, демонстрирующих распределения амплитудно-фазовых характеристик для используемого частотного диапазона, еще и трёхмерные растровые изображения исследуемого пространства. Имеется возможность предоставления трехмерного набора данных послойно в виде набора радиоизображений, полученных при различных сечениях зондируемого объема вдоль выбранного направления; также возможна трехмерная визуализация неоднородностей.



Рис. 10. Трехмерная модель георадара (а), амплитудная карта зондируемого подповерхностного объекта на глубине 10 см в результате имитационного моделирования (с) и фото расположения георадара на малом БПЛА со взлетной массой до 50 кг (б)

Fig. 10. 3D model of ground-penetrating radar (a), amplitude map of the probed subsurface object at a depth of 10 cm as a result of simulation (c) and a photo of the location of the ground-penetrating radar on a small UAV with a take-off weight of up to 50 kg (b)

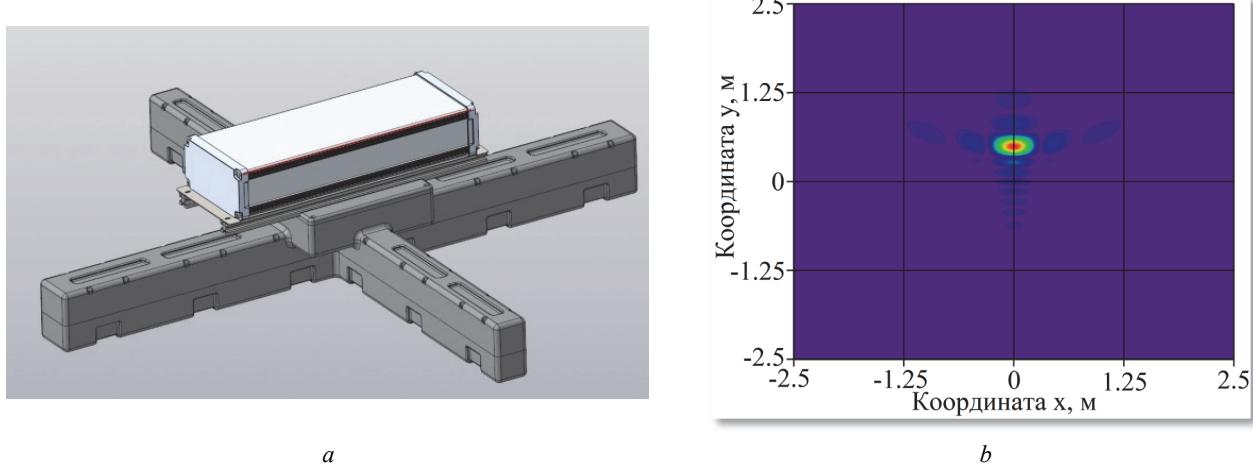


Рис. 11. Трехмерная модель нелинейного локатора (а) и распределение принятого сигнала от источника нелинейности (б)

Fig. 11. Three-dimensional model of nonlinear locator (a) and distribution of received signal from nonlinearity source (b)

Нелинейный локатор работает на принципе гармонической локации и использует две ортогональные линейные антенные решетки: передающую из 16 элементов на частоте 2,45 ГГц и приемную из 32 элементов на частоте 4,9 ГГц (вторая гармоника). Передающая решетка формирует широкую диаграмму направленности в плоскости сканирования. Приемная решетка, оснащенная фазовращателями, обеспечивает электронное сканирование луча. Обе решетки работают с круговой поляризацией (рис. 11).

Быстродействие обоих устройств позволяет собирать данные при скорости линейного перемещения приемопередающей апертуры ~ 100 км/ч и потребляемой мощности не более 50 Вт. Последние упомянутые характеристики расширяют возможности использования БПЛА для поиска взрывоопасных объектов на больших территориях.

В заключение можно сказать, что использование представленных георадара и нелинейного локатора в сочетании с БПЛА представляет собой мощный инструмент для решения широкого круга задач. Несмотря на некоторые ограничения, их преимущества делают их незаменимыми в условиях, где традиционные методы исследования недоступны или неэффективны. Среди приложений для использования таких систем, установленных на БПЛА, можно выделить задачи гуманитарного разминирования больших территорий.

9. Исследование и разработка алгоритмов интеллектуального управления беспилотными воздушными судами. Целью проекта является разработка и исследование бортового алгоритма прокладывания пути при облете препятствий беспилотным воздушным судном как наиболее важной и ресурсоемкой части автономной системы управления. Автономные системы управления беспилотными воздушными судами (БВС) представляют собой комплекс технических решений и алгоритмов, которые позволяют вы-

полнять задачи без непосредственного участия человека-оператора. Эти системы обеспечивают управление полётом, навигацию, стабилизацию, а также выполнение заданий с минимальным вмешательством оператора или без него.

С точки зрения использования современных технологий искусственного интеллекта и машинного обучения открывается возможность для разработки интеллектуальных БВС. Однако до сих пор не выработано универсального решения, позволяющего достичь полной автономности работы БВС, особенно когда речь идет про сложные динамичные среды полета и отсутствие сигналов глобально спутниковых навигации.

Нейросетевые алгоритмы как инструменты искусственного интеллекта повсеместно используются для обеспечения БВС интеллектуальными функциями. В настоящей работе проводится исследование возможных путей применения нейросетевых технологий для построения современных интеллектуальных систем управления БВС. Особое внимание уделяется технологиям глубокого обучения с подкреплением.

Исходя из последних мировых тенденций, использование алгоритмов Deep Reinforcement Learning (DRL, обучение с подкреплением) в области построения систем автоматического управления БВС набирает наибольшую популярность. Это связано в первую очередь с возможностями, которые открываются перед исследователями и разработчиками таких систем в области построения автономных БВС, в том числе без использования сигналов глобальной спутниковой навигации, что превращает БВС в интеллектуальное самостоятельное устройство, способное ориентироваться в пространстве и быть независимым от большинства внешних факторов при выполнении заданий. Наиболее активно используемым подходом является алгоритм глубоких Q-сетей, или DQN (рис. 12).

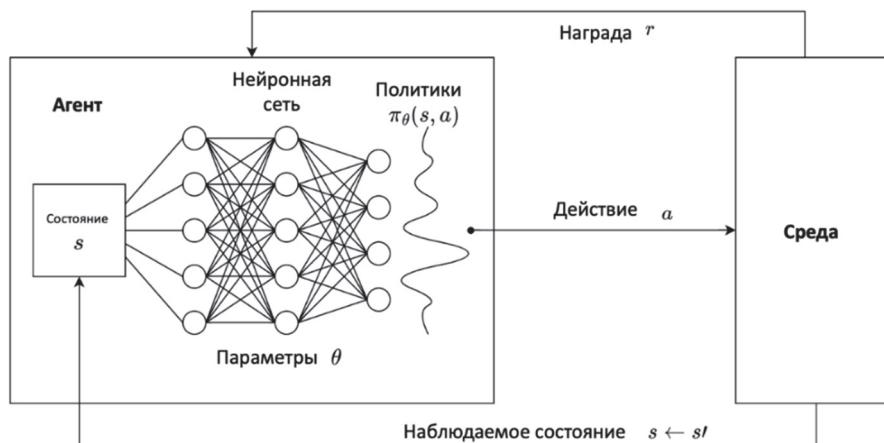


Рис. 12. Структурная схема работы DQN

Fig. 12. Block diagram of DQN operation

Используя структурную схему на рис. 12, представляется возможным описать базовые принципы внедрения алгоритма DQN в построение автономной системы управления БВС. В нашем случае БВС выступает агентом, на борту которого функционирует глубокая нейронная сеть. БВС функционирует в некоторой окружающей среде, в которой необходимо прокладывать маршруты и облетать препятствия, исходя из принятого задания. В процессе обучения нейронная сеть настраивается таким образом, чтобы при получении информации от окружающей среды она могла вырабатывать нужную стратегию передвижения, которая в дальнейшем преобразуется в управляющие сигналы БВС. Обучение может происходить непрерывно всегда и тем самым нейронная сеть, рас-

полагаясь на борту БВС, учится и адаптируется к большему количеству состояний БВС в окружающей среде; кроме того, обучение может происходить до того момента, когда эффективность выработанных решений достигнет заданного разработчиком порога в зависимости от критерия эффективности.

На первом этапе проекта внедрение DQN в систему управления БВС отрабатывалось на основе средств и методов имитационного моделирования в среде симуляции полетов Gazebo, OpenAI Gym и Webots (рис. 13). На следующем этапе проекта разработанный алгоритм будет интегрирован и апробирован на борту реального БВС мультиrotорного типа в закрытом полигоне Томского государственного университета.



Рис. 13. Имитационная среда полета

Fig. 13. The flight simulation environment

Образовательные технологии в области БАС

Для обеспечения кадровой потребности отрасли в БАС в Томском государственном университете разработана и реализуются многоуровневая система подготовки кадров, включающая в себя программы профессионального обучения по рабочим профессиям, программы переподготовки кадров ДПО, программы бакалавриата, базового высшего образования и магистерские программы.

С 2022 г. Томский государственный университет ведет подготовку операторов БАС и специалистов по эксплуатации БАС в рамках Федерального проекта «Содействие занятости» национального проекта «Демография». Всего обучено в рамках данного проекта для отрасли БАС порядка 1 000 человек.

В рамках Федерального проекта «Развитие кадрового потенциала ИТ-отрасли» в проекте «Цифровые кафедры» в вузах для обучающихся реализуется программа переподготовки «Оператор БАС: фотограмметрия и дистанционное зондирование». В 2024 г. по данной программе было обучено 114 человек, а в

2025 г. обучение прошли 204 человека. В проекте «Код будущего» для школьников реализуется обще развивающая программа «Основы программирования БПЛА с использованием языка Python», по которой в 2024 г. прошли обучение 31 человек.

В 2024 г. Томский государственный университет стал образовательным провайдером в Федеральном проекте «Кадры для БАС». В рамках данного проекта 37 программ ТГУ прошли отбор, 17 регионов представили полигоны БАС для практических занятий, успешно выпустились 741 человек. По итогам реализации проекта в 2024 г. ТГУ вошел в ТОП-3 провайдеров данной программы по количеству обученных слушателей.

В 2023 г. Томский государственный университет вошел в пилотный проект, направленный на изменение уровней профессионального образования (Указ Президента РФ №343 от 12.05.2023 г.). В рамках данного проекта разработаны и реализуются несколько пилотных программ, имеющих уникальную модельную структуру (рис. 14), спроектированную с

учетом аналитики рынка труда БАС и запроса формирующейся отрасли БАС. Данная модель предусматривает вариативные (гибкие) сроки обучения, высокую практикоориентированность и возможность для обучающихся раннего выхода на рынок труда.

В частности, особенностью одной из программ базового высшего образования «Технологии проектирования и управления БАС», набор на которую впервые осуществлен в 2024 г., является объединение двух направлений подготовки: 27.03.05 «Инноватика» и 24.03.03 «Баллистика и гидроаэродинамика».



Рис. 14. Модель образовательной программы «Технологии проектирования и управления БАС»

Fig. 14. ALS Design and Control Technologies Educational Program Model

Цель объединения – подготовить специалистов, способных эффективно решать задачи математического моделирования в области разработки новых технологий и проектирования беспилотных авиационных систем с использованием высокопроизводительной компьютерной техники, способных координировать инновационные инициативы в области беспилотных авиационных систем, а именно осуществлять мониторинг последних тенденций и достижений в области технологий БАС; выявлять перспективные решения и возможности; внедрение новых продуктов, услуг и процессов, связанных с БАС; создание и поддержание партнерских отношений с исследователями, производителями, операторами и регулирующими органами для содействия инновациям в сквозных видах профессиональной деятельности в промышленности. Обучающийся уже с первого курса выстраивает свою индивидуальную траекторию посредством выбора одного из трех профессиональных модулей в зависимости от выбранного направления подготовки: 24.03.03 «Баллистика и гидроаэродинамика» – профессиональные модули «Цифровые технологии в проектировании БАС», «Компьютерное

моделирование динамических процессов управления БАС»; 27.03.05 Инноватика – профессиональный модуль «Сопровождение и внедрение технологий БАС». В связи с объединением в рамках ОП двух направлений подготовки у студента появляется вариативность выбора своей траектории обучения на основании собственных предпочтений и получаемых навыков. При этом в связи с обучением студентов двух направлений подготовки представляется возможным формирование междисциплинарных инженерных команд, способных решать прикладные задачи отрасли БАС в продуктовой логике, тем самым усиливая эффект проектного и группового обучения.

Программа «Программное и аппаратное обеспечение БАС», первый набор на которую также осуществлен в 2024 г. по направлению 09.03.02 Информационные системы и технологии, собрана по ядерному типу. Например, ядро «Программирование» реализуется Высшей ИТ школой ТГУ, которая использует уникальные разработанные подходы и методики, направленные на ускоренную подготовку специалистов. В то время как ядро «Цифровая электроника и ПЛИС» реализуется в Передовой инженерной школе

(ПИШ) Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР). Таким образом, в программе удалось собрать воедино лучшие практики и компетенции Большого университета Томска для подготовки высококвалифицированных инженеров-разработчиков встраиваемых систем.

Объединяющей особенностью пилотных программ базового высшего образования в Томском государственном университете является возможность получения дополнительных квалификаций во время обучения. В связи с этим ряд преподаваемых дисциплин преимущественно на первом и втором курсах обучения формируются по модульному принципу, чтобы в процессе обучения студенты получали рабочие профессии «оператор БАС» и «чертежник-конструктор», а также дополнительную квалификацию «специалист по техническому обслуживанию БАС». Это позволит обучающимся начинать свой профессиональный путь уже после первого курса обучения.

Для обеспечения подготовки студентов в деятельности формате используются студенческие конструкторские бюро (СКБ) и FabLab. Создание таких образовательных пространств и встраивание их деятельности в процесс подготовки кадров вызваны запросом индустрий инженерного сектора на качественную подготовку кадров с компетенциями и навыками, обеспечивающими быстрое вхождение студентов в профессиональную деятельность. Студенческие конструкторские бюро как специально созданная в университетах инфраструктура позволяет эти задачи решать, привлекая к практической подготовке студентов – представителей инженерной отрасли, обеспечивая установление связей между образовательной, научно-исследовательской, опытно-конструкторской, инновационной и предпринимательской деятельностью в рамках СКБ, а также повышение эффективности образовательного процесса посредством применения практических заданий и решения проектных задач с использованием современных технологий и оборудования.

СКБ ТГУ позиционируется как пространство, оснащенное ресурсами, инструментами и оборудованием, где студенты могут реализовать свои технические идеи, начиная с разработки концепции и заканчивая созданием полноценного продукта.

В деятельность бюро закладывается следующий основной функционал:

- выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских студенческих работ в области проектирования и разработки;
- выполнение заказов от предприятий-партнёров на возмездном основании;
- поддержка научно-исследовательской деятельности студентов и сотрудников СКБ;

– подготовка студентов – участников СКБ к профессиональной и научной деятельности.

Перечень работ, выполняемых в СКБ ТГУ по направлению БАС:

- разработка, проектирование, прототипирование и испытание технических систем;
- проведение аэродинамических, гидродинамических и прочностных расчетов изделий;
- 3D-моделирование элементов конструкций;
- изготовление электронных устройств, пайка и программирование микроконтроллеров;
- 3D-печать, фрезеровка и лазерная резка материалов;
- изготовление элементов конструкций из композитных материалов;
- изготовление формообразующих конструкций из полимеров;
- постобработка изделий.

В СКБ разработаны и внутренние критерии оценки выполненной работы студентов. Как правило, в них включаются пункты, связанные с эффективностью командной работы и правильностью выстраивания коммуникации с партнёром. На этапах работы над проектом промежуточное оценивание осуществляется закреплённый за командой наставник. По завершению всей работы студенческая команда представляет проект на открытом мероприятии.

Итоговые результаты работы студентов по выполнению проектов и сами продукты оцениваются непосредственно их заказчиками.

Помимо образовательной деятельности, большое внимание уделяется профориентационным мероприятиям, направленным на популяризацию БАС среди школьников, учащихся СПО, вузов и молодых специалистов. В течение 2023 и 2024 гг. организована серия профориентационных мероприятий: в апреле 2023 г. проведен хакатон «Беспилотные авиационные системы для школьников» совместно с ГК Геоскан (60 участников), в рамках «Архипелага 2023» проведено соревнование по эксплуатации БАС в сельскохозяйственной отрасли, организатор НОЦ «ПИШ Агробиотек» ТГУ (6 команд, 30 участников, 3 региона), в ноябре 2023 г. проведен хакатон «Беспилотники.Агро» для учащихся 8–11 классов из Томска и Томского района, а также студентов Томского госуниверситета (100 участников), в апреле – мае 2024 г. проведены соревнования «Летай в ТГУ», участниками которого стали 120 школьников и студентов СПО, 50 студентов вузов г. Томска выполнили задания, представленные партнерами соревнований.

В 2024 г. г. Томск стал одним из 30 регионов, оснащенных для обучения работе с беспилотными авиационными системами в рамках Федерального про-

екта «Стимулирование спроса на отечественные беспилотные авиационные системы». 19 школ и 1 техникум получили оборудование для реализации образовательных процессов по разработке, производству и эксплуатации беспилотных авиационных систем. В ноябре 2024 г. в рамках регионального форума «За Агро – будущее» Томский государственный университет провел соревнования «АгроБАС», участниками которого стали 150 школьников и студентов СПО. Одним из условий данного соревнования было использование школами оборудования, приобретенного в рамках проекта.

Все вышеперечисленные активности не были бы возможны без развивающейся инфраструктуры. За последние два года, в Томском государственном университете открыты Учебный центр пилотирования БАС, Полигон БАС, СКБ «БАС», СКБ «Беспилотные технологии».

В 2024 г. открыто структурное подразделение НОЦ «Институт развития инновационной авиации» с целью реализации мероприятий по обеспечению условий для создания нового типа подготовки, осуществления прорывных разработок и исследований,

направленных на решение задач по разработке, производству, испытаниям, сертификации и эксплуатации беспилотной и официально пилотируемой авиационной техники (включая решение задач организации воздушного движения, развития наземной инфраструктуры воздушного транспорта, транспортной и авиационной безопасности), а также для обеспечения стратегически значимого сектора экономики страны высококвалифицированными кадрами для достижения технологической независимости.

В начале 2025 г. в г. Томске открылся Научно-производственный центр Беспилотных авиационных систем, оснащенный самым современным оборудованием, способным обеспечить весь цикл производства БАС и её компонентов. Для региона это стало значимым событием. Желание плотного взаимодействия Томского государственного университета с новым отраслевым предприятием в регионе привело к открытию в ТГУ базовой кафедры интеллектуальных технических систем. Это способствует не только развитию образовательных программ, но и созданию новых рабочих мест, улучшению качества подготовки кадров и внедрению современных технологий.

Список источников

1. CloudCFD // Официальный сайт CloudCFD. [Б. м.], 2025. URL: <http://cloudcfdu.ru/> (дата обращения: 04.03.2025).
2. Матвиенко О.В., Архипов В.А., Данейко О.И., Усанина А.С., Басалаев С.А., Булавко А.М. Моделирование динамики орошения подстилающей поверхности при авиационном тушении пожаров // Инженерно-физический журнал. 2023. Т. 96, № 5. С. 1242–1254.
3. Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Динамика осаждения кластера монодисперсных капель // Письма в журнал технической физики. 2024. Т. 50, № 5. С. 19–22.
4. Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Романдин В.И. Экспериментальное исследование распада вертикальной жидкой струи // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. Т. 92. С. 69–78.
5. Исмаилов К. К. Определение аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата самолетного типа аналитическими методами // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 78. С. 112–124.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662797 Российская Федерация. Программа для оптимизации аэродинамики планера БПЛА градиентными методами: № 2022662109: заявл. 30.06.2022; опубл. 07.07.2022 / К. Исмаилов; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».
7. Исмаилов К.К., Кагенов А.М. Оптимизация формы крыла беспилотного летательного аппарата самолетного типа // Перспективы развития фундаментальных наук : сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. Т. 3. С. 37–39.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619386 Российской Федерации. Программный комплекс для создания цифровой модели БПЛА на основе подходов параметрического моделирования / К. Исмаилов, А.М. Кагенов; № 2022618826; заявл. 18.05.2022; опубл. 20.05.2022, Бюл. № 5.
9. Павлов М.С. Оптимальное проектирование корпуса беспилотного летательного аппарата // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 73. С. 71–80.

References

1. CloudCFD [Electronic resource] // Official website of CloudCFD – Electron. dan. – [B. M.] (2025). – URL: <http://cloudcfdu.ru/> (accessed 03/04/2025).
2. Matvienko, O.V., Arkhipov, V.A., Daneyko, O.I., Usanina, A.S., Basalaev, S.A. & Bulavko, A.M. (2023) *Modelirovaniye dinamiki orosheniya podstilayushchey poverkhnosti pri aviatsionnom tushenii pozharov* [Modeling irrigation dynamics the underlying surface during aviation fire extinguishing]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 96 (5). pp. 1242–1254.
3. Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Zolotorev, N.N., Perfilieva, K.G. & Usanina, A.S. (2024) *Dinamika osazhdeniya klastera monodispersnykh kapel'* [Dynamics of deposition of a cluster of monodisperse droplets]. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 50 (5). pp. 19–22.

4. Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Perfilieva, K.G., Polenchuk, S.N. & Romandin, V.I. (2024) *Eksperimental'noye issledovaniye raspada vertikal'noy zhidkoy strui* [Experimental investigation of vertical liquid jet decay]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mehanika*. 92. pp. 69–78.
5. Ismailov, K.K. (2022) *Opredeleniye aerodinamicheskikh kharakteristik bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa analiticheskimi metodami* [Determination of aerodynamic characteristics of an unmanned aerial vehicle of an airplane type by analytical methods]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mehanika*. 78. pp. 112–124.
6. Certificate of state registration of the computer program No. 2022662797 Russian Federation. A program for optimizing the aerodynamics of a UAV airframe using gradient methods: No. 2022662109: application. 30.06.2022: published 07.07.2022 / K. Ismailov; applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "National Research Tomsk State University".
7. Ismailov K. K., Kagenov A.V. (2021) *Optimizatsiya formy kryla bespilotnogo letatel'nogo apparata samoletnogo tipa* [Optimization of the wing shape of an aircraft-type unmanned aerial vehicle]. Prospects for the development of fundamental sciences: Proceedings of the XVIII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. 2. pp. 37–39.
8. Ismailov, K. & Kagenov, A.M. (2022) *Programmnyj kompleks dlya sozdaniya cifrovoy modeli BPLA na osnove podhodov parametricheskogo modelirovaniya* [A software package for creating a digital UAV model based on parametric modeling approaches]. Certificate of state registration of the computer program № 2022619386 Russian Federation. № 2022618826, appl. 18.05.2022, publication date 20.05.2022, Bul. № 5.
9. Pavlov, M.S. (2021) *Optimal'noye proyektirovaniye korpusa bespilotnogo letatel'nogo apparata* [Optimal design of the body of an unmanned aerial vehicle]. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i mehanika*. 73. pp. 71–80.

Информация об авторах:

Шашев Дмитрий Вадимович – кандидат технических наук, доцент кафедры интеллектуальных технических систем Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: dshashev@mail.ru

Рыжих Юлия Николаевна – кандидат физико-математических наук, декан физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: jula@ftf.tsu.ru

Ерофеев Александр Анатольевич – кандидат географических наук, заведующий проблемной научно-исследовательской лаборатории гляциоклиматологии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: erofeew@yandex.ru

Шидловский Станислав Викторович – доктор технических наук, декан факультета инновационных технологий Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shidlovskiy@mail.ru

Нестерова Наталья Владимировна – старший преподаватель кафедры управления качеством Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nesterovanv@mail.tsu.ru

Костишин Кирилл Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kostushink@hotmail.com

Аскеров Адиль – разработчик программного обеспечения, ООО «Облачный вычислительный центр» (Томск, Россия). E-mail: askerov121099@gmail.com

Червакова Анастасия Владимировна – генеральный директор, ООО «Облачный вычислительный центр» (Томск, Россия). E-mail: ch-nastyta1997@mail.ru

Архипов Владимир Афанасьевич – доктор физико-математических наук, заведующий отделом 10 Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Басалаев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории 11 Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Булавко Антон Михайлович – кандидат физико-математических наук, ГУ МЧС России по Томской области (Томск, Россия).

Перфильева Ксения Григорьевна – кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры математической физики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Федоров Сергей Михайлович – студент физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия).

Юстус Александр Витальевич – инженер физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yustus2130990@mail.ru

Исмаилов Куат – ассистент кафедры прикладной аэромеханики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: mendikjan@gmail.com

Шипилов Сергей Эдуардович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: shipilov@mail.tsu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Shashev Dmitry V., Cand.Sc. (Engineering), associate professor, department of intelligent technical systems, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: dshashev@mail.ru

Ryzhikh Yulia N., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), dean, faculty of physics and engineering, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: jula@ftf.tsu.ru

Yerofeev Alexander A., Cand.Sc. (Geography), head of the laboratory, research laboratory of Glacioclimatology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: erofeew@yandex.ru

Shidlovsky Stanislav V., Dr.Sc. (Engineering), dean, faculty of innovative technologies, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: shidlovskiy@mail.ru

Nesterova Natalia V., Senior lecturer, department of quality management, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nesterovanv@mail.tsu.ru

Kostyushin Kirill V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, department of applied aerodynamics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kostushink@hotmail.com

Askerov Adil, Software developer, Cloud Computing Center LLC (Tomsk, Russian Federation). E-mail: askerov121099@gmail.com

Chervakova Anastasia V., General Director, Cloud Computing Center LLC (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ch-nastya1997@mail.ru

Arkhipov Vladimir A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), head of department 10, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Basalaev Sergey A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, laboratory 11, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Bulavko Anton M., Ministry of Emergency Situations of Russia for the Tomsk Region (Tomsk, Russian Federation).

Perfilieva Kseniya G., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), assistant professor, department of mathematical physics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Fedorov Sergey M., Student, faculty of physics and engineering, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

Justus Alexander V., Engineer, faculty of physics and engineering, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yustus2130990@mail.ru

Ismailov Kuat, Assistant professor, department of applied aerodynamics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: mendikjan@gmail.com

Shipilov Sergey E., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), professor, department of radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: shipilov@mail.tsu.ru

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.10.2025; одобрена после рецензирования 27.11.2025; принята к публикации 02.12.2025

The article was submitted 30.10.2025; approved after reviewing 27.11.2025; accepted for publication 02.12.2025