В.Ф. Жуковский,
кандидат технических наук, заведующий сектором, научный руководитель Юношеского клуба космонавтики им. Г.С.Титова, педагог дополнительного образования

И.Я. Жуковская,
заведующий лабораторией, педагог дополнительного образования

Г.А. Грачев,
педагог дополнительного образования

Санкт-Петербургский городской Дворец творчества юных (ГБНОУ «СПБ ГДТЮ»)

Проект «АнСат» Юношеского клуба космонавтики им.Г.С.Титова. Авиационный сегмент

Начиная с 2014 года в Юношеском клубе космонавтики им. Г.С.Титова (ЮКК) Санкт-Петербургского городского Дворца творчества юных реализуется научно-технический проект «АнСат».

Данный проект дает возможность реализации профессионального «лифта» для школьников, студентов и молодых специалистов с участием профессионалов аэрокосмической отрасли, позволяет всем участникам проекта проявить себя в решении конкретных научно-технических задач.

Миссия проекта — переход к новому качеству аэрокосмического образования старших школьников.

Проект «АнСат» является долговременным комплексным проектом, охватывающим три направления:

1. Космический сегмент (разработка группировки спутников «АнСат»)
2. Авиационный сегмент (разработка системы автоматической посадки БПЛА на мобильную платформу)
3. Наземный сегмент (разработка единой системы управления космическим и авиационным сегментами проекта и стендами на их основе)

Для организации работы над проектом в ЮКК создано молодежное КБ, объединяющее членов клуба – учащихся 7-11 классов, студентов – выпускников клуба и педагогов.

В данной статье речь пойдет об разработках в рамках авиационного сегмента, так как в этом направлении проект был доведен до натурных испытаний, которые были проведены на лагерном сборе клуба с привлечением большого числа участников.

Цель авиационного сегмента проекта – разработка системы автоматической посадки БПЛА самолетного типа на мобильную платформу оригинальной конструкции

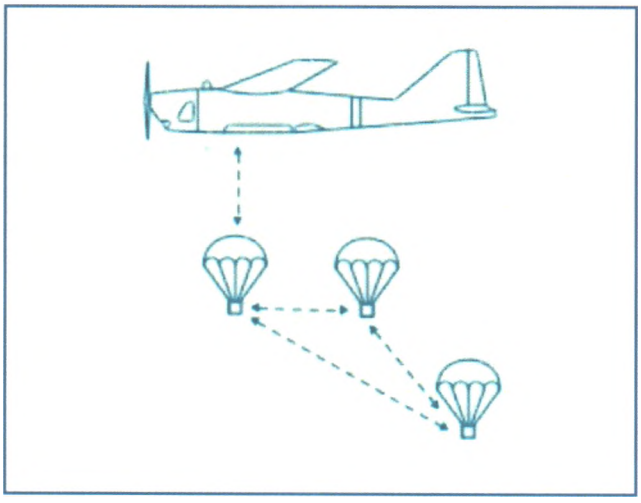


Рисунок 1 - Отработка системы взаимодействия отдельных спутников группировки между собой

Основные параметры БПЛА:

- размах крыльев ~ 3÷4 м
- длина ~ 1,5÷2 м
- взлетный вес ~ 40 кг

Задачи, выполняемые БПЛА:

1. доставка отдельных модулей группировки (испытательных зондов) на требуемую высоту
   - масса полезной нагрузки – 10 кг
2. сброс зондов в заданном районе
3. посадка БПЛА в автоматическом режиме на мобильную платформу:
   - скорость посадки – 15 м/с
   - масса посадки – 15 кг
   - путь до полной остановки – 4 м
   - максимально допустимая перегрузка – 3 единицы

Для работ по авиационному направлению в нашем КБ были организованы рабочие группы по разработке: мобильной платформы, системы торможения БПЛА, алгоритма посадки, системы управления БПЛА на этапе посадки; группы по организации натурных испытаний, обработки и анализа результатов.

Разработка мобильной платформы посадки БПЛА

Задача: Разработать прототип мобильной платформы

Решение: Платформа на колесном шасси, имеющая форму правильной шестиугольной призмы. В качестве шасси посадочной платформы был выбран отечественный малотоннажный автомобиль ГАЗ-3302 «ГАЗель» со следующими габаритами: длина кузова – 4 м; ширина кузова – 1,91 м; высота кузова – 2,4 м; максимальная длина – 6,6 м; максимальная ширина – 2 м.

В транспортном положении платформа располагается на кузове автомобиля (рисунок 2), диаметр конструкции ~ 1,2 м.

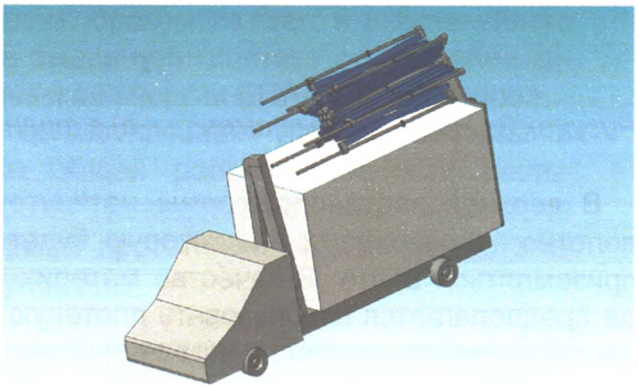
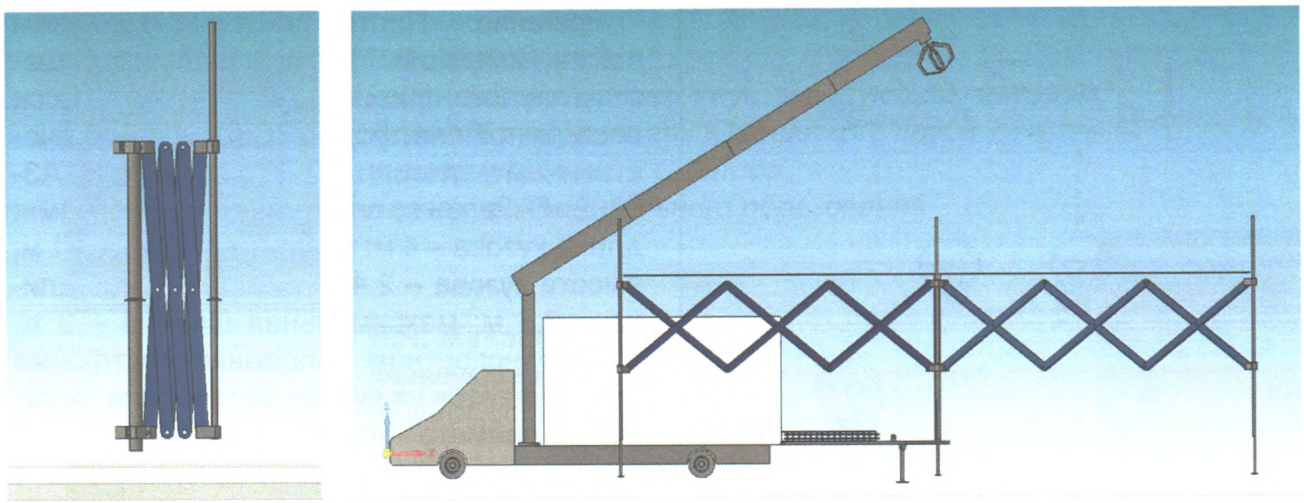


Рисунок 2 - Мобильная посадочная платформа в транспортном положении

Раскрытие платформы в рабочее состояние осуществляется в 3 этапа:

1. Открытие апарели
2. Раскрытие ножничных элементов до полного натяжения тросов (рисунок 3)
3. Выдвижение и закрепление выносных опор

Конструкция платформы в рабочем состоянии (рисунок 4) представляет собой правильную шестигранную призму, боковыми ребрами которой являются опорные стойки. Стойки связаны с центральным стержнем с помощью ножничных элементов. Ножничные элементы в шестигранной конструкции испытывают радиальные нагрузки за счет натяжения тросов, которыми связаны опорные стойки. Это обеспечивает жесткость всей конструкции и фиксацию ее положения.



а б

Рисунок 3 - Ножничные элементы: а) в транспортном положении, б) в рабочем положении

В верхней части платформы натянуто полотно – поверхность, на которую будет приземляться БПЛА. В качестве материала предполагается использовать плетеную сетку, т.к. такая структура обладает наилучшими прочностными показателями.

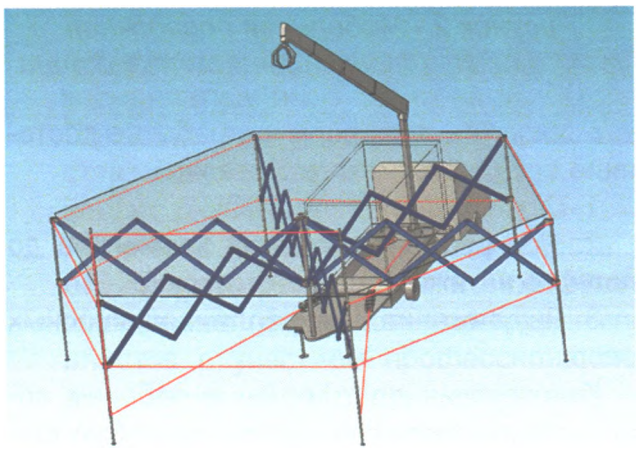


Рисунок 4 - Мобильная посадочная платформа в рабочем положении

В рабочем состоянии растянутое полотно возвышается над кузовом автомобиля примерно на 0.5 м, расстояние между опорами – 6 м, а диаметр описанной окружности – 12 м.

Разработка системы торможения БПЛА

Задача: Разработать тормозную систему, обеспечивающую гашение кинетической энергии БПЛА. Система торможения должна располагаться на мобильной платформе, при этом перегрузка, испытываемая аппаратом при торможении, не должна превышать 3 единиц.

Решение: Погашение кинетической энергии БПЛА серией тормозных ударов. Основная задача тормозного устройства – погасить скорость БПЛА до нуля. При этом кинетическая энергия БПЛА преобразуется в работу системы торможения. В нашем случае, работа торможения заключается в протягивании троса с шарами через серию барьеров (рисунок 5).

Перед началом торможения БПЛА обладает кинетической энергией, рассчитываемой по формуле:

$$E_k = \frac{mV_0^2}{2},$$

где: m – масса БПЛА, а V_0 – скорость БПЛА в момент зацепления троса тормозным гаком.

Основной задачей при проектировании тормозного устройства является миними-

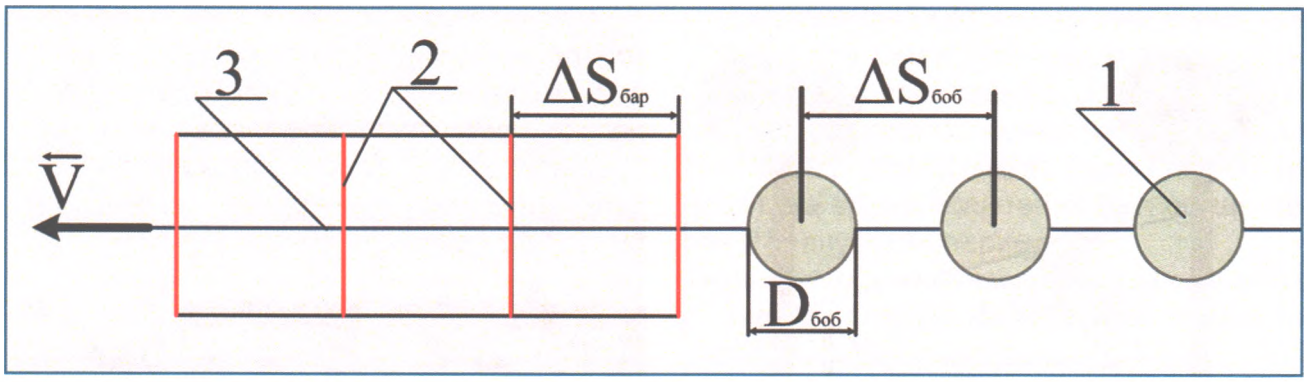


Рисунок 5 - Схема тормозной системы: 1 – шары, 2 – барьеры, 3 – трос

зация действующих на тело перегрузок n до значения в 3 единицы. При этом, в качестве основного ограничения выступает величина тормозного пути X_m, который не может превышать 65% диаметра описанной окружности всей платформы.

Будем считать, что рассматриваемая тормозная система поглощает энергию порциями, то есть дискретно, а не непрерывно. Такое решение принято в связи с тем, что основная часть энергии поглощается в момент прохождения шаром барьера. Полная работа A, совершенная системой, рассчитывается по формуле:

$$A=\sum_{i=1}^{n} A_i,$$

где: A_i – работа торможения при прохождении одного шара через барьер, n – количество преодоленных барьеров.

При этом, A_i должна быть больше минимальной энергии, требуемой для преодоления барьера. Для оценки минимально требуемой Ai примем, что вся работа уходит на растяжение пружин. Тогда:

$$A_{i_{min}}=b\Delta E_{пр}=b\frac{k\Delta x^2}{2},$$

где: $E_{пр}$ – потенциальная энергии пружины, k – коэффициент упругости пружины, Δx – удлинение пружины, требуемое для прохождения шара через барьер, b – число пружин, установленных в барьере.

Таким образом, из всего вышесказанного была выдвинута гипотеза о погашении кинетической энергии БПЛА серией ударов.

С целью проверки данной гипотезы, а также общей работоспособности системы были проведены натурные испытания с первым прототипом тормозной системы (рисунок 6).

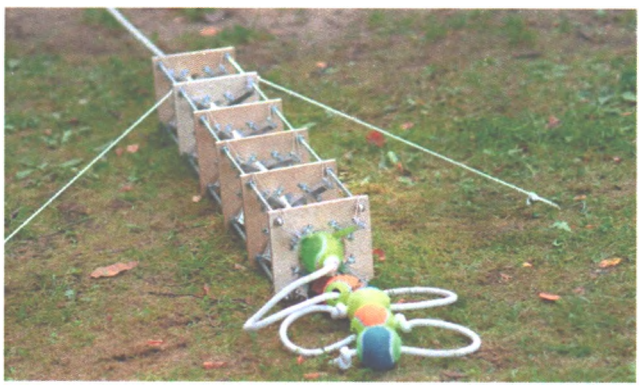


Рисунок 6 - Прототип тормозного устройства

Проведение натурных испытаний

Натурные испытания разработанного прототипа системы торможения проводились на летнем лагерном сборе, прошедшем с 1 по 21 августа 2018 года в ДООЛ «Солнечный» пос. Молодежное.

В лагерном сборе, в подготовке и непосредственном проведении эксперимента приняло участие 80 учащихся и 6 педагогов клуба.

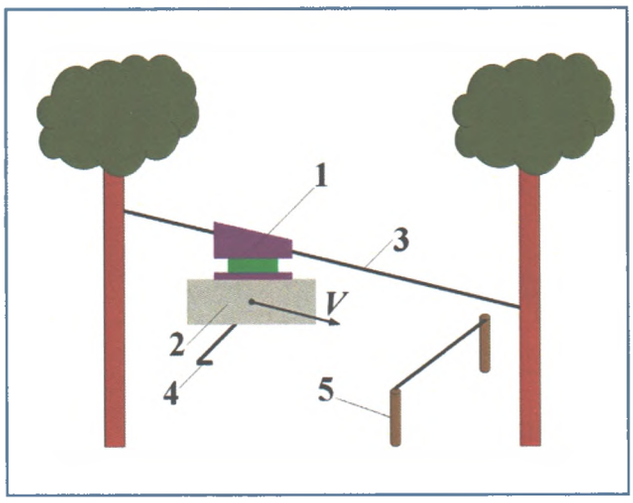


Рисунок 7 - Схема организации эксперимента

Схема организации эксперимента представлена на рисунке 7.

Между двумя деревьями натягивался трос (3), имитирующий глиссаду БПЛА. К тросу с помощью тележки (1) с электронным оборудованием (одноплатный компьютер *«Raspberry Pi»* с модулем *«Sense Hat»*) подвешивался массо-габаритный макет (МГМ) БПЛА (2) с тормозным гаком (4). После пуска, МГМ набирал скорость, а в момент зацепления гаком за трос (5) срабатывало тормозное устройство.

Для проведения эксперимента было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее в режиме реального времени обмениваться информацией, поступающей от разных источников. Данное ПО было размещено на одноплатном компьютере *«Raspberry Pi»* с модулем *«Sense Hat»*, установленном на тележке с МГМ, и на рабочих местах операторов, принимающих данные экспериментов.

Одноплатный компьютер *«Raspberry Pi»* осуществлял потоковое вещание значений акселерометра с платы *«Sense Hat»* по *Wi-Fi*. На рабочих местах операторов осуществлялся прием информации с построением графиков в режиме реального времени.

При проведении эксперимента использовалось два канала получения данных:

1. Экспериментальная видеосъемка процесса торможения. Камера устанавливалась напротив участка торможения, после чего шла запись эксперимента с частотой 50 кадров в секунду (50 Герц) (рисунок 8).

Рисунок 8 - Получение данных с помощью видеосъемки

2. Получение данных акселерометра с платы *«Sense Hat»* с частотой 10 Герц в режиме реального времени по Wi-Fi (рисунок 9).

Рисунок 9 - Получение данных с акселерометра

Организация натурных испытаний

Предварительная подготовка к проведению экспериментов была проведена еще в городе на занятиях КБ силами инициативной группы (рисунок 10).

Рисунок 10 - Команда организаторов испытаний

Впроцессеподготовкииспытанийнепосредственно на смене учащиеся были разделены на 4 рабочие группы по 20 человек в каждой. Участники групп распределялись по лабораториям по сферам деятельности (таблица 1).

В каждой лаборатории из числа участников проекта были избраны руководители. Подготовка к испытаниям длилась 15 дней (с 2 по 16 августа), а сами натурные испытания были проведены за 2 дня (17 и 18 августа). За время испытаний был осуществлен 21 запуск (эксперимент).

Обработка экспериментальных данных

Задача: Отработка методики обработки экспериментальных данных.

В результате проведенных натурных испытаний были выявлены недостатки прототипа тормозной системы – в процессе прохождения через барьеры шары бились о конструкцию системы, создавая дополнительные «помехи».

Из всех проведенных экспериментов были выявлены 3, в которых «помехи» были минимальны. Дальнейшая обработка велась уже с отобранными данными.

Таблица 1. Организационное обеспечение эксперимента - лаборатории

Лаборатории	Основные обязанности
Лаборатория по эксплуатации экспериментальной установки	Сборка и разборка экспериментальной установки Перезарядка экспериментальной установки Обеспечение сохранности конструкции
Лаборатория экспериментальной съемки	Обеспечение экспериментальной съемки процесса торможения
Лаборатория по синхронизации процессов испытаний	Выдача указаний по пуску макета, записи файлов Заполнение бланков отчетности испытаний
Лаборатория программного обеспечения	Обеспечение передачи пакетов по multicast Прием данных с датчиков и запись их в файл Работа с интерфейсом
Лаборатория анализа видео-файлов	Контроль измерения на испытаниях Обработка видео-файлов Получение кинематических параметров
Лаборатория обработки экспериментальных данных	Получение файлов с данными по перегрузкам Получение кинематических параметров
Лаборатория фото- видео-сопровождения	Художественная фото- и видео- фиксация работы групп
Лаборатория по связям с общественностью	Сбор и оформление всех полученных результатов Выступление с докладом на итоговом сборе

Отрабатывалось две методики обработки дискретных данных:

1. По данным акселерометра. Путем интегрирования вычислялась скорость и график перемещения МГМ в процессе торможения – *V(t)* и *S(t)*.

2. По данным видеосъемки. Путем дифференцирования графика перемещений вычислялись скорость и ускорение.

Рассмотрим более подробно второй метод, так он дал более точные результаты (с акселерометра данные были получены с шагом в 100 мс, в то время как видеофайл давал шаг в 20 мс).

Для выделения из видеофайла данных о перемещении МГМ во времени нужно выполнить следующие шаги:

1. Разбить видео на кадры (рисунок 11);

2. Вычислить масштабный коэффициент *k* по формуле:

$$k=\frac{L_{real}}{L_{img}},$$

где: L_{real} – истинное расстояние между контрастными метками на тросе (0,5 м), L_{img} – расстояние между контрастными метками на изображении.

Вычислить перемещение объекта между двумя кадрами по формуле:

$$\Delta S = k^*(S_{img1} - S_{img2}),$$

где S_{img} – расстояние от метки до объекта на кадре.

В результате обработки видеофайла был получен график перемещения МГМ *S(t)* (таблица 2).

Таблица 2. Получение графика перемещения МГМ

№	t [c]	L_{img}	S_{img}	S_{real} [м]
1	0,02	29,0259	0,07	0,03
2	0,04	18,8566	0,39	0,20
3	0,06	8,9443	0,71	0,36
4	0,08	33,2415	1,02	0,51
5	0,1	22,4652	1,34	0,67
6	0,12	11,7577	1,65	0,83
7	0,14	37,6017	2,00	1,00
8	0,16	25,7614	2,31	1,16
9	0,18	13,8458	2,63	1,32
10	0,2	1,0198	2,97	1,49
11	0,22	29,5076	3,30	1,65

Далее вычисляются скорость, ускорение и перегрузка.

Скорость – это производная перемещения по времени:

$$v(t)=S'(t)=\frac{dS}{dt}\Rightarrow\frac{\Delta S_{real}}{\Delta t}$$

Рисунок 11 - Разбиение видео на кадры

Ускорение – это производная скорости по времени:

$$a(t)=v'(t)=\frac{dv}{dt}\Rightarrow\frac{v_{(i+1)}-v_i}{\Delta t}$$

В результате такой обработки нескольких экспериментов были получены графики перемещений, скорости и перегрузок от времени.

Среди самых важных результатов обработки данных выделим следующие:

- Среднее время торможения – 0,38 с
- Средняя длина тормозного пути – 3,78 м
- Диапазон макс. Перегрузок – 3,53÷7,42 единиц

Представление проекта и результатов экспериментов специалистам

С 17 по 23 декабря 2018 года для участников КБ, активно работающих над проектом «АнСат», был организован учебный выезд в Москву. Во время поездки ребята познакомились с предприятиями авиационной и космической отрасли (РКК «Энергия», ЦПК имени Ю.А.Гагарина, «ОКБ Сухого», Сколково), а также встретились со специалистами и представили последним свой проект.

Авиационное направление проекта было представлено в «ОКБ Сухого» (рисунок 12). Представители одного из ведущих авиационных предприятий заинтересовались представленным проектом: задавали вопросы по конструкции мобильной платформы, давали советы по настройке системы торможения. Всё общение прошло в очень профессиональной и дружеской атмосфере, что, конечно, очень понравилось ребятам.

В итоге, специалисты предложили внести следующие изменения:

1. Использовать упругие элементы в местах крепления полотна к опорным стойкам мобильной платформы для гашения вибрации;
2. Использовать для снятия БПЛА с платформы вместо механической руки магнитную ловушку;

Кроме того, уточнили порядок эксплуатационных перегрузок для типовых БПЛА.

Важно отметить, что перед участниками проекта «АнСат» ставятся профессиональные задачи, решение которых нетривиально, а зачастую, требует мнения, или даже помощи специалистов. Именно благодаря подобным стажировкам проект будет и дальше развиваться.

Рисунок 12 - Представление проекта «АнСат» в «ОКБ Сухого»