

УДК 378.147+629.7.021

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-3-111-120

Научная статья

EDN: SQGVJK

ИНЖЕНЕРНЫЙ КЕЙС КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ КОНЦЕПЦИЙ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ СТРАТОСФЕРНОГО РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Д.К. ЩЕГЛОВ^{1,2,3}, Д.А. ФЁДОРОВ^{1,2},
С.К. САВЕЛЬЕВ^{3,1}, А.Г. САЙБЕЛЬ^{1,3},
С.Е. ЕРОШИН²

¹ АО «НПО «ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД»,
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

² АНО ДПО НОЦ ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»
ИМ. АКАД. В.П. ЕФРЕМОВА, МОСКВА,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

³ ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ»
ИМ. Д.Ф. УСТИНОВА, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ,
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

В статье излагается опыт авторов по использованию метода инженерных кейсов для формирования облика инновационной системы воздушного старта ракет-носителей (РН) с аэростатической стратосферной платформы. Данный инженерный кейс проводился для шести старшеклассников в рамках июльской проектной смены «Большие вызовы» в образовательном центре «Сириус» в 2024 г. За три недели работы было выполнено обоснование технической реализуемости и экономической эффективности создания аэростатической стратосферной платформы для старта РН легкого и среднего классов. Показано, что подобная платформа сможет выполнять задачу первых ступеней системы космического запуска без задействования инфраструктуры космодрома. Запуск можно будет осуществлять с любой географической широты на орбиту необходимого наклонения. Также рассматривается возможность предоставления услуг запуска другим странам. По результатам работы на проектной смене авторы сделали вывод о высокой эффективности применения инженерных кейсов для формирования инновационных концепций развития ракетно-космической промышленности. Исследование выполнено при поддержке секции Международных проблем науки и образования Российской академии естественных наук.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: проектное обучение, инженерный кейс, опыт внедрения, образовательный процесс, ракеты-носители, стратосферный старт, стратостаты, космические программы

© Д.К. Щеглов, Д.А. Фёдоров, С.К. Савельев,
А.Г. Сайбель, С.Е. Ерошин
Поступила в редакцию 17.07.2025

Original article

ENGINEERING CASE AS A TOOL FOR FORMING INNOVATIVE CONCEPTS: THE EXAMPLE OF A PROJECT TO CREATE A STRATOSPHERIC ROCKET-SPACE COMPLEX

D.K. SHCHEGLOV^{1,2,3}, D.A. FYODOROV^{1,2},
S.K. SAVELYEV^{3,1}, A.G. SAIBEL^{1,3},
S.E. EROSHIN²

¹ JSC OBUKHOV PLANT, SAINT PETERSBURG,
RUSSIAN FEDERATION

² ANO DPO NOC VKO «ALMAZ – ANTEY»
NAMED AFTER ACAD. V.P. YEFREMOV,
MOSCOW, RUSSIAN FEDERATION

³ FGOOU VO BSTU «VOENMEKH» NAMED
AFTER D.F. USTINOV SAINT PETERSBURG,
RUSSIAN FEDERATION

This paper presents the authors' experience in application of the engineering case method for development of the concept of an innovative space launch system for rocket carriers (RC) based on stratospheric aerostatic platform. This engineering case was conducted with six high school students during the July project session «Big Challenges» at the Sirius Educational Center in 2024. During the three weeks course, basics of technical feasibility and economic efficiency were developed for creating a stratospheric aerostatic platform for launching light and medium-class rockets. It was demonstrated that such a platform may serve as the first stage of a space launch system while not requiring the creation of spaceport infrastructure. The platform could be used to launch rockets from any latitude into the desired orbital inclination. The possibility of offering launch services to other countries is also considered. Based on the results of the project session, the authors concluded that the engineering case method is highly effective for developing innovative concepts in rocket and space industry. The study was carried out with the support of the Section on International Problems of Science and Education of the Russian Academy of Natural Sciences.

KEYWORDS: project-based learning, engineering case, implementation experience, educational process, rocket carriers, stratospheric launch, stratostats, space programs

ВЕДЕНИЕ

Концепция технологического развития России направлена на модернизацию образовательных программ среднего профессионального, высшего и дополнительного профессионального образования. При этом ее главной целью является приведение их содержания, структуры и результатов обучения в полное соответствие с компетенциями, необходимыми для освоения критически значимых и сквозных технологий, успешное развитие которых во многом зависит от активного формирования инновационных подходов, концепций и решений. Воплощение этих задач требует принципиально нового взгляда на подготовку инженерных кадров, особенно для предприятий высокотехнологичной промышленности, играющих ключевую роль в развитии экономического и научно-технического потенциала страны [2, 3].

Совершенствование образовательных процессов осуществляется на основе системного подхода, который базируется на практико-ориентированных образовательных программах [5]. Особое внимание уделяется обучению управлению проектами полного жизненного цикла – от идеи до коммерциализации, что позволяет готовить специалистов, способных не только разрабатывать инновационные решения, но и внедрять их в реальный сектор экономики.

Формирование кадрового резерва для крупных предприятий высокотехнологичной промышленности осуществляется в настоящее время по модели «школа – вуз – предприятие», направляя старшеклассников и студентов на профильные образовательные траектории, включающие целевое обучение и практику [1]. Одним из наиболее эффективных механизмов такого взаимодействия является проектное обучение в формате инженерных кейсов. Этот метод воспроизводит полный цикл работы над инженерным проектом, моделируя реальные производственные процессы. В отличие от традиционных учебных заданий, участники решают комплексные задачи, требующие глубокого анализа и обоснованных решений, что способствует развитию инженерного мышления и профессиональных компетенций.

С 2016 г. Концерн ВКО «Алмаз – Антей» совместно с БГТУ «ВОЕНМЕХ» ежегодно проводит инженерные кейсы на Всероссийском форуме «ПроеКТОриЯ» и в рамках программы «Большие вызовы» в образовательном центре «Сириус» [8]. Практика показала высокую эффективность этого формата. Наибольшую вовлеченность демонстрируют школьники, работающие с космической тематикой, что объясняется традиционно высоким интересом к освоению космоса и доступностью научно-популярных материалов [2, 4]. При этом длительные инженерные кейсы (от двух недель) позволяют участникам разрабатывать инновационные концепции, сопровождая их инженерными и экономическими исследованиями,

что способствует формированию системного понимания роли передовых технологий в развитии страны.

В качестве одного из примеров применения такого подхода рассмотрим результаты трехнедельной работы шести старшеклассников над инженерным кейсом по формированию облика инновационной системы воздушного старта РН, организованного авторами в рамках июльской проектной смены «Большие вызовы» в 2024 г.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОБЛЕМА

Современные космические программы предусматривают развертывание спутниковых группировок, орбитальных станций и исследование Луны и Марса, что требует частых запусков РН. Однако создание и эксплуатация сверхтяжелых РН и необходимой инфраструктуры сопряжены с высокими затратами, что делает актуальным поиск альтернативных решений для снижения стоимости запусков. Одним из таких подходов является старт с аэростатической стратосферной платформы (сверхкрупного дирижабля), позволяющий уменьшить массу РН за счет исключения первых ступеней.

В настоящее время ряд стартапов разрабатывает технологии воздушного запуска для ракет легкого и сверхлегкого класса, однако аналогичных проектов для РН среднего и тяжелого классов пока не существует. Инженерный кейс направлен на разработку концепции такой аэростатической платформы, включая техническое и экономическое обоснование ее реализуемости.

Гипотеза исследования заключалась в том, что многоразовая стратосферная стартовая платформа может заменить первые ступени системы космического запуска, что позволяет уменьшить массу РН на 30–45%, и исключить необходимость в наземной инфраструктуре космодромов. Запуски с такой платформы возможны с любой широты на орбиту заданного наклона, что также открывает перспективы для коммерческих запусков на международном рынке.

Целью работы над инженерным кейсом являлась разработка концептуального облика инновационной аэростатической стартовой платформы с обоснованием ее работоспособности и экономической целесообразности. Итогом работы должна стать оригинальная, конкурентоспособная конструкция, способная существенно снизить затраты на космические запуски.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

С середины XX века научно-образовательное сообщество активно внедряет проектное обучение в подготовку инженерных кадров. В этом подходе обучающийся становится активным участником образовательного процесса, а преподаватель выполняет роль наставника и эксперта. Такой подход способствует

развитию у будущих инженеров актуальных профессиональных компетенций, а также интеграции междисциплинарных знаний.

Так, в работе Lavado-Anguera S. et al. [11] выполнен обзор 54 источников, охватывающий 24-летний период, и сделано заключение об эффективности проектного обучения как целостной педагогической модели, ориентированной на практическое применение теоретических знаний. Опыт внедрения данного подхода в учебный процесс образовательных учреждений рассмотрен в работах Lavado-Anguera S. et al. [12] и Steele A.L. [14].

Исследование, проведенное специалистами Берлинского технического университета, также демонстрирует значимость проектного обучения в инженерном образовании, в частности при разработке цифровых двойников [8]. Авторы отмечают, что современная инженерная среда требует все большего уровня междисциплинарности, инноваций и креативности. В исследовании Zhao L. et al. [15] рассматривается эффективность внедрения проектного обучения при изучении физики в школах Китая. Отмечается, что такой подход помогает учащимся открывать ценность основных научных концепций и их связь с технологией, инженерией и обществом, а также развивать ответственность.

Как отмечается в работе Sasson I. et al. [12], проектное обучение способствует формированию критического мышления и исследовательских навыков у старшеклассников и студентов.

Таким образом, проектное обучение является действенным инструментом для разработки инновационных решений, особенно в такой отрасли, как космические технологии. При этом появление новых конструктивных материалов и источников энергоснабжения инициировало активное обсуждение перспектив развития стратосферных пусковых платформ [10, 13].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались методы мозгового штурма, экспертных оценок, математического моделирования, численного интегрирования, конечных элементов, а также системы проектирования (CAD) и инженерного анализа конструкций (CAE).

Проект охватывал полный цикл инженерно-технических задач, включая [6]:

- конструкторскую проработку и оценку технической реализуемости;
- расчет прочности конструкции и грузоподъемности;
- анализ технических решений, оборудования и материалов;
- разработку инфраструктуры обслуживания и старта;
- экономическое обоснование производства, эксплуатации и запусков.

Концепция платформы формировалась коллективным мозговым штурмом, затем работа велась по взаимосвязанным направлениям, требующим координации внутри команды. Помимо разработки конструкции особое внимание уделялось этапам производства, эксплуатации и экономической целесообразности, определяющим выбор оптимального решения [7]. В соответствии с задачами проекта участники кейса распределили роли: главный конструктор (разработка схемно-конструктивных решений, организация работ), инженер-конструктор (разработка 3D-моделей, компоновка), инженер-технолог (вопросы изготовления и эксплуатации), инженер-расчетчик (проведение инженерных расчетов) и экономист (оценка стоимости проекта).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование актуальности исследования.

Стратосферная платформа обеспечивает запуски с любой точки Земли на орбиты любого наклонения, а также выбор зон падения отработанных ступеней. Одновременно решается задача транспортировки РН от места сборки к точке старта. Это открывает возможность запусков для стран, способных создавать РН, но не имеющих космодромов – таких в мире около 40.

Несмотря на существование стартапов, таких как SpaceRyde (Канада), B2Space (Великобритания) и Zero 2 Infinity (Испания), они ориентированы только на РН легкого и сверхлегкого класса. Для РН среднего и тяжелого класса аналогов в настоящее время не существует.

Концепция стратосферного старта для ракет легкого класса. Анализ существующих проектных решений показал, что запуск легких РН с аэростата уже занял свою нишу. Типичными конструктивными особенностями таких систем является одноразовый аэростат, мягкая оболочка аэростата, подвес ракеты под углом, наполнение аэростата водородом или гелием.

В рамках инженерного кейса предложена концепция запуска легкой РН с аэростатической платформы (рис. 1). Используется недорогой одноразовый аэростат с полиэтиленовой оболочкой «нулевого давления» (диаметр ~50 м), заполненной водородом. Тросовый подвес РН массой до 12,5 т обеспечивает старт с высоты 20 км. Ориентировочная стоимость водорода для наполнения оболочки – 1,5 млн руб., материала и изготовления оболочки – 600 тыс. руб.

Оценка экономии массы при стратосферном старте для РН среднего класса. Старт с высоты более 20 км технически сложен и требует дорогостоящей аэростатической платформы. Поэтому важно оценить выигрыш в массе РН при старте с 20 км.

Для этого была составлена и численно проинтегрирована система уравнений, описывающая полет РН. Параметры РН, использованные в расчетах, представлены в таблице 1.

Расчеты траектории вывода полезной нагрузки на орбиту 200 км (без учета аэродинамического сопротивления и потерь тяги на поворот) показали, что двухступенчатая РН массой 207 т способна вывести 7 т при старте с высоты 20 км, а для вывода полезной нагрузки с уровня моря требуется трехступенчатая РН типа РН «Союз» массой 312 т.

Таким образом, стратосферный старт позволяет снизить стартовую массу РН на ~ 1/3, что подтверж-

дает целесообразность разработки аэростатической стартовой платформы.

Конструкция оболочки аэростата для старта РН среднего класса. Поскольку для надежного размещения РН на аэростатической платформе требуются жесткие несущие конструкции, а ожидаемые размеры всей конструкции составляют сотни метров, представляется проблематичным использовать мягкие баллоны, наполненные гелием. Кроме того, учитывая, что на высоте 20 км атмосферное давление составляет ~ 0,055 атм, потребный объем гелия, как и его цена окажутся слишком велики. Поэтому целесообразно использовать вакуумные баллоны, однако предварительные расчеты показали, что никакие материалы не обеспечат необходимой жесткости конструкции на схлопывание (потерю устойчивости) при сохранении необходимой подъемной силы.

Альтернативным решением стала двухслойная оболочка (рис. 2), в которой пространство между слоями заполнено гелием под давлением на 100 кПа выше, чем давление воздуха снаружи аэростата. Наддув позволяет обеспечить достаточную жесткость баллона исключительно за счет разницы нагрузок на внутренний и внешний слой оболочки.

Предполагается, что подъемная сила аэростата остается постоянной на высотах от 0 до 20 км, а воздух из оболочки откачивается насосами по мере набора высоты. Для конструктивной надежности используются два баллона, оболочка которых разделена на ячейки 2×2 м. Основной материал – улеткань, для проклейки соединений; может применяться стеклоткань. Материалы выбраны с учетом прочности и плот-

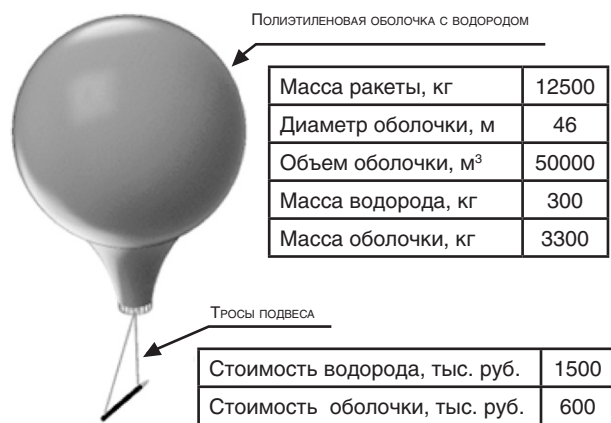


РИС. 1.

Концепция системы стратосферного запуска РН легкого класса

ТАБЛИЦА 1.

Параметры РН

Параметр			3-х ступенчатая («Союз»)	2-х ступенчатая
Первая ступень	Сухая масса	$M_{сух1}, Т$	15	–
	Масса топлива	$M_{топ1}, Т$	163	–
	Тяга	$F_{тяги1}, тс$	342 – 416	–
	Время работы двигателя	$T_1, с$	118	–
	Расход	$R_1, кг/с$	1377	–
Вторая ступень	Сухая масса	$M_{сух2}, Т$	7	13
	Масса топлива	$M_{топ2}, Т$	93	159
	Тяга	$F_{тяги2}, тс$	80 – 94	302
	Время работы двигателя	$T_2, с$	320	181
	Расход	$R_2, кг/с$	291	874
Третья ступень	Сухая масса	$M_{сух3}, Т$	2	2
	Масса топлива	$M_{топ3}, Т$	25	25
	Тяга	$F_{тяги3}, тс$	30	30
	Время работы двигателя	$T_3, с$	300	300
	Расход	$R_3, кг/с$	84	84
Полезная нагрузка			$M_{пн}, Т$	7
Общая стартовая масса			$M_{общ}, Т$	207
Высота старта			$H_{старта}, км$	20

ности (для углеволокна прочность на разрыв достигает 4 ГПа).

Размеры баллонов (L и D) определяются по объему, затем рассчитывается расстояние между оболочками (H) для уравнивания внешнего давления. Прочность и устойчивость конструкции проверялись с помощью МКЭ, которые показали, что вакуумную полость нужно разделить на секции по 50 м, иначе баллон потеряет устойчивость и его сечение изменится с круглого на овальное, что может привести к разрушению.

Модель масс. С целью определения габаритов аэростатической платформы для стратосферного старта РН среднего класса была разработана модель масс (рис. 3).

Масса РН принята равной 200 т. Затем задавались начальные размеры платформы (L, D и H), на основе которых рассчитываются объемы баллонов и сила Архимеда на различных высотах. После этого вычислялась масса углепластиковых оболочек, гелия и воздуха на всех высотах.

На основе габаритов РН и баллонов определялась масса ферменных конструкций, количество винтов, электродвигателей и насосов для движения аэростата по курсу. Из принятых параметров оборудования рассчитывается число аккумуляторов и солнечных панелей. Общая масса конструкции уравнивается архимедовой силой, поэтому описанный процесс повторялся до достижения баланса веса и архимедовой силы.

Облик аэростатической платформы для старта РН среднего класса. Концепция стратосферной платформы для запуска РН среднего класса предполагает использование двух баллонов по 7,5 млн м³ каждый, соединенных ферменной конструкцией. Между баллонами расположена ферменная конструкция с ра-

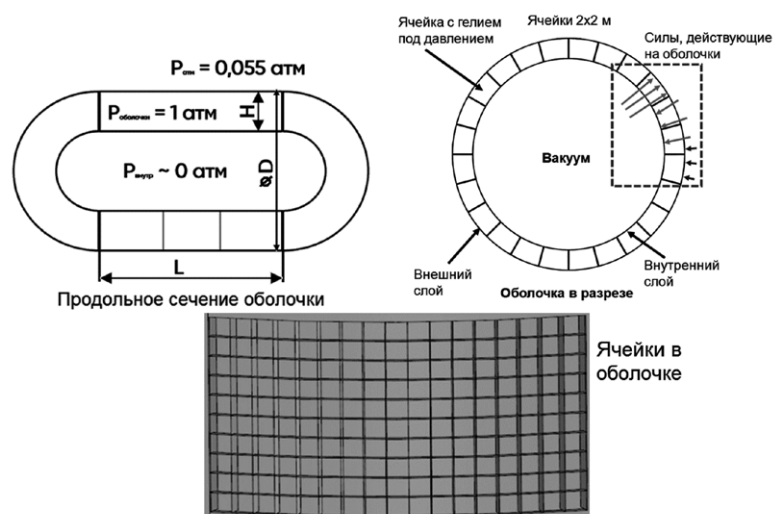


РИС. 2.

Оболочка аэростата для старта РН среднего класса

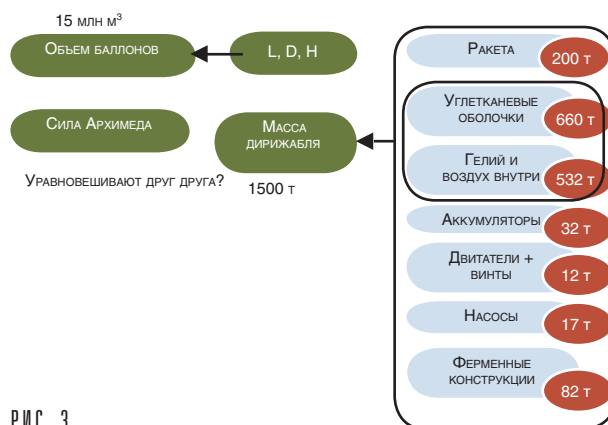


РИС. 3.

Модель масс аэростатической платформы для стратосферного старта РН среднего класса и полученные сбалансированные значения масс элементов конструкции стратосферной платформы

кетой, которая транспортируется вывешенной в горизонтальном положении, а перед запуском переводится лебедками в вертикальное (рис. 4). На платформе установлены три двигателя для движения по курсу, поворотный двигатель с блоком аккумуляторов в передней части, а также солнечные панели на поверхности баллонов. Длина платформы – 990 м, ширина – 220 м, диаметр каждого баллона – 100 м, расстояние между оболочками – 20 м.

Ферменные конструкции. Два баллона аэростатической платформы соединяются между собой ферменной конструкцией (рис. 5), в центре которой вывешивается РН. Для данных конструкций были проведены статические и динамические расчеты прочности, а сечения балок, их расположение и материалы (алюминий, титан, сталь) подбирались с учетом минимизации массы при сохранении запасов прочности и устойчивости от веса РН и аэродинамических сил не ниже ~ 1,5.

После оптимизации конструкции ее масса составила 82 т, при длине самой крупногабаритной части 115 м. Изгиб конструкции при вывешенной массе 200 т не превышает 2 м, а запас устойчивости при максимальной боковой ветровой нагрузке составляет 1,4. Также проверялась прочность конструкции при старте РН.

Служебные системы. Служебные системы аэростата подбирались из существующего и доступного на рынке оборудования и включают в себя:

- 14 вакуумных насосов для регулирования давления (управление высотой) с производительностью 180 000 м³/ч;
- 4 вертолетных винта от МИ-6 с тягой 40 т на уровне моря;

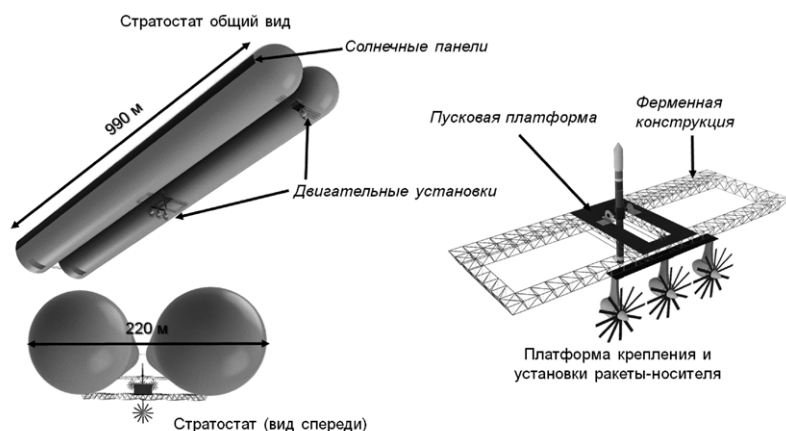


РИС. 4.

Облик аэростатической платформы для старта РН среднего класса

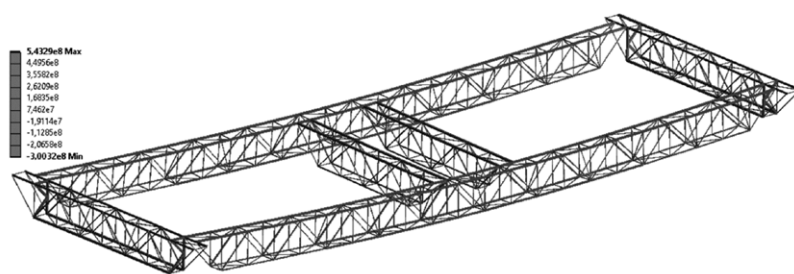


РИС. 5.

Напряжения в ферменной конструкции от веса РН, Па

- 10 электродвигателей мощностью 2 МВт для работы насосов и винтов;
- сверхтонкие солнечные панели (1 кВт/кг), покрывающие верхнюю половину баллонов, для выработки электроэнергии;
- аккумуляторные батареи с емкостью 600 Вт ч/кг для работы ночью.

Все такие системы уже существуют и успешно эксплуатируются.

Согласно расчетам, скорость подъема/спуска составит 1 км/ч, а дневная крейсерская скорость против ветра – 20–30 км/ч. Ночью средняя скорость против ветра будет близка к 0 км/ч, при этом запас электроэнергии в аккумуляторах позволит лишь поддерживать платформу в статичном положении, чтобы избежать ее сноса ветром. Для этого курс будет выстраиваться с учетом минимизации встречного ветра ночью.

Эксплуатация. Эксплуатация стратосферной платформы включает несколько этапов: прибытие платформы на завод-изготовитель РН, погрузка ракеты горизонтально с помощью лебедок, фиксация транспортировочно-пускового кольца на ферменных конструкциях, подъем платформы на заданную высоту, движение к месту запуска, перевод ракеты в вер-

тикальное положение, запуск и возвращение платформы для получения следующей ракеты или перемещения на техобслуживание. Все эти этапы выполняются автономно без участия человека, и ракеты не используют компоненты, требующие низких температур, такие как жидкий кислород.

Особое внимание уделяется безопасности, в частности взаимодействию со струей ракетных двигателей. На рисунке 6 в реальном масштабе показано сравнение стартовой площадки РК «Союз» и стратосферной платформы. Из рисунка видно, что расстояние между баллонами платформы составляет 20 м. Этого достаточно для предотвращения повреждения оболочек. Расчеты показывают, что стартовая тяга обеспечит вертикальное ускорение РН 5 м/с^2 , а для платформы – $1,9 \text{ м/с}^2$, что позволит ракете быстро удалиться от баллонов. На высоте 20 км ширина реактивной струи больше, чем при старте с земли, поэтому баллоны нужно покрыть дополнительным теплозащитным покрытием с учетом запаса массы (~30 т).

Производство стратосферной платформы. В рамках инженерного кейса было проведено исследование возможности производства стратосферной платформы в России. Крупногабаритные конструкции могут быть изготовлены на таких предприятиях, как ПАО «Ижорские заводы» и АО «ТЯЖМАШ», а сборку всей платформы может осуществить строительный холдинг «Титан-2» и другие предприятия.

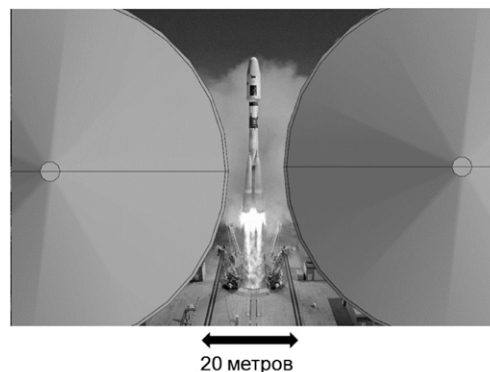


РИС. 6.

Сравнение размеров стратосферной платформы и стартовой площадки РН «Союз»

Для производства баллонов аэростата была предложена следующая технология. Баллоны состоят из секций по 50 м, для которых создаются вертикальные оправки высотой 50 м – одна для внутреннего и одна для внешнего слоя оболочки. Внутренний слой из углеткани проклеивается по внутренней оправке, затем устанавливается внешняя оправка, на которой также проклеивается внешний слой. Между слоями оболочки проклеиваются углетканевые полосы, разделяющие ее на ячейки 2×2 м. Секции закрываются углетканевой переборкой, после чего ячейки надуваются воздухом для сохранения формы. Затем секция извлекается из оправок и переносится на стапель длиной 1 км, где собирается в единый баллон.

Стоимость проекта. Оценочная стоимость производства стратосферной платформы с учетом стоимости материалов, производства и оборудования составила ~ 164 млрд руб. (в ценах 2024 г.) или 1,64 млрд долларов США. Подробная калькуляция ценообразования представлена в таблице 2.

Для сравнения в таблице 3 приведены заявленные стоимости создания различных крупногабаритных объектов и конструкций. Так, стоимость космодрома «Восточный» по оценкам 2015 г. уже составляла порядка 500 млрд руб., а стоимость программы «Морской старт» составила ~ 400 млрд руб. (в пересчете по курсу доллара США на 2024 г.). Стоимость американского авианосца «Джеральд Р. Форд» составляет более 20 млрд долларов США.

Из анализа таблиц 2 и 3 можно сделать заключение о том, что проект по созданию стратосферной платформы для старта РН среднего класса является конкурентоспособным с экономической точки зрения.

КОМПЕТЕНЦИИ, ПРИОБРЕТЕННЫЕ ПРОЕКТНОЙ КОМАНДОЙ

Участие в реализации инженерного кейса, направленного на формирование облика инновационной системы воздушного старта РН с аэростатической стратосферной платформы в рамках проектной смены 2024 г. в Образовательном центре «Сириус», обеспечило старшеклассникам уникальную возможность погружения в широкий спектр инженерных и научно-технических дисциплин. За три недели интенсивной работы участники освоили базовые положения и методы из следующих областей знаний:

- математического анализа (дифференциальное и интегральное исчисление);
- решения и численного интегрирования систем дифференциальных уравнений;
- математического программирования и алгоритмизации инженерных задач;
- теоретической механики и прикладной динамики;
- сопротивления материалов и строительной механики;
- основ газовой динамики и моделирования аэроди-

намических процессов;

- работы в CAD- и CAE-средах (включая проектирование и инженерный анализ конструкций);
- использования систем компьютерной алгебры для аналитических расчетов и визуализации;
- основ проектирования ракетно-космических систем;
- теории полета ракеты, баллистики и небесной механики;
- принципов работы ракетных двигателей и химии ракетных топлив;
- технологии машиностроительного производства;
- материаловедения и подбора конструкционных материалов;
- инженерной экономики и технико-экономического обоснования проектов;
- инженерного и промышленного дизайна, ориентированного на функциональность и производственные ограничения.

Отдельное внимание в проекте уделялось практической компоненте: школьники самостоятельно разрабатывали и изготавливали масштабные модели, а также проводили их испытания. На рисунке 7 представлена подготовка команды к запуску экспериментального макета ракеты с аэростатической платформы, что стало кульминацией практического этапа проекта.

Кроме получения предметных знаний, участники кейса развили целый ряд надпредметных и метапредметных компетенций, включая:

- системное и критическое мышление;
- навыки командной работы и управления проектами;
- исследовательские умения (поиск, обработка и интерпретация научной информации);
- коммуникативные навыки (в том числе защита технических решений);
- устойчивую учебную мотивацию и способность к самообучению.

Высокая эффективность применения метода инженерных кейсов подтверждается не только успешным завершением данного проекта, но и тем, что многие участники продолжили развивать полученные компетенции в рамках других инженерно-технических инициатив, олимпиад и научных конкурсов. Полученный опыт позволил им осознанно связать собственные технические интересы с профильными дисциплинами, что стало важным шагом в профессиональном самоопределении.

ВЫВОДЫ

Практическое применение метода проектного обучения на основе инженерных кейсов подтвердило высокую эффективность его использования в процессе подготовки специалистов для решения сложных междисциплинарных проектных задач, включая разработ-

ТАБЛИЦА 2.

Оценочная стоимость производства стратосферной платформы

Материалы	Цена за кг или м², руб.	Количество материала в м² или в кг	Итог, млн руб.
Углеткань	3750	1500000	5625
Алюминий	1590	44000	70
Титан	1650	35000	58
Гелий	10600	120000	1272
Итого за материалы			7025
Производство	Коэффициент от стоимости материалов		Итог, млн руб.
Проект	2		14 050
Изготовление	10		70 250
Оборудование для цеха (оправки, стапели и т.п.)	10		70 250
Итого за производство			154 550
Оборудование	Цена за штуку,млн руб.	Кол-во	Итог, млн руб.
Насосы	1	16	19
Двигатели	105	3	315
Винты	1	3	3
Солнечные панели	0,013	140 000	910
Аккумуляторы	0,042	20 000	840
Итого за оборудование			2087
ИТОГО, млн руб.			163 682

ТАБЛИЦА 3.

Стоимости создания различных крупногабаритных объектов и конструкций

Объект	Масса, т	Цена, млрд руб.	Цена, млн \$
Восточный (цены на 2015 год)	—	160–500	6000–10000
Морской старт	—	308–397	3500–4500
Новый стартовый комплекс в Куру	—	61	691
Нефтеплатформа	506 000	27–88	300–1000
Авианосец «Джеральд Р. Форд»	112 000	2116	21000



РИС. 7.

Команда инженерного кейса на испытании макета стратосферной платформы

ку и коммерциализацию инновационных решений. В частности, предлагаемый авторами ролевой подход к проведению инженерного кейса позволил команде старшеклассников за три недели реализовать проект по формированию концепции стратосферного запуска РН легкого и среднего классов с высоты до 20 км.

Стратосферный старт РН легкого класса предложено осуществлять при помощи одноразового аэростата с полиэтиленовой оболочкой «нулевого давления», заполненной водородом, и тросового подвеса РН под углом.

Стратосферный старт РН среднего класса предложено осуществлять при помощи многоразовой аэростатической платформы, состоящей из жесткой ферменной конструкции и вакуумных баллонов с

двухслойной оболочкой, в которой пространство между слоями заполнено гелием. В результате решения инженерного кейса было обосновано, что использование такой аэростатической платформы позволяет повысить экономическую эффективность запуска за счет подтверждения гипотезы о снижении массы РН на 30–45% и исключения необходимости создания наземной инфраструктуры. Проведенная экономическая оценка проекта показала, что затраты на создание многоразовой аэростатической платформы (~1,64 млрд долларов США) сопоставима с затратами на традиционных космодромах или системы типа «Морской старт», но при этом предлагаемое техническое решение обеспечивает большую гибкость и перспективы международной коммерциализации.

Таким образом, применение инженерных кейсов в образовательном процессе не только способствует углубленному освоению технических дисциплин, но и позволяет обучающимся разрабатывать проекты, имеющие реальный потенциал внедрения в индустрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДРОБОТЕНКО Ю.Б. Образовательная модель «Школа – вуз – предприятие» – залог качества образования // Вестник Омского государственного педагогического университета. Гуманитарные исследования. 2015. №3 (7). С. 97–99. EDN UGWC SL.
2. ЕРОШИН С.Е., ШЕГЛОВ Д.К., ФЕДОРОВ Д.А., АКСЕНОВА Д.В., ЮРЧИКОВА Я.В. Инженерные кейсы по космонавтике как эффективный инструмент профориентационной работы среди школьников старших классов // Инновации. 2021. № 10 (276). С. 14–19. DOI 10.26310/2071-3010.2021.276.10.003. EDN BZKCYI.
3. Подвязников М.А., Баушев С.В. Замысел и реализация возрождения научных школ на предприятиях ОПК // Научный вестник оборонно-промышленного комплекса России. 2021. №4. С. 86–95. DOI 10.52135/2410-4124-2021-4-86. EDN WHANPE.
4. Сайбель А.Г., Баушев С.В., Маторина Д.Ю. Инженерный проект как инструмент повышения увлеченности молодежи космонавтикой // Титовские чтения. 2023. С. 54–62. EDN MDDXFF.
5. ШЕГЛОВ Д.К., ЕРОШИН С.Е. Особенности стратегического развития научно-образовательной деятельности на предприятиях высокотехнологичной промышленности // Инновации. 2021. № 9(275). С. 9–13. DOI 10.26310/2071-3010.2021.275.9.002. EDN BSOMLA.
6. ШЕГЛОВ Д.К., ЕРОШИН С.Е., ТИМОФЕЕВ В.И., БУКАРЕВ А.М. Проектная форма обучения как эффективный механизм подготовки инженерных кадров // Инновации. 2024. № 1 (297). С. 37–45. EDN LQSODA.
7. ШЕГЛОВ Д.К., ФЕДОРОВ Д.А., КОНОВАЛЬ-ЧИК А.П. Решение прикладных организационно-технических задач методом инженерных кейсов: учебное пособие / СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2019. 63 с. ISBN 978-5-907054-83-7.
8. ШЕГЛОВ Д.К., ФЕДОРОВ Д.А., САЙБЕЛЬ А.Г., ЕРОШИН С.Е., САВЕЛЬЕВ С.К. Анализ опыта внедрения проектной формы обучения на основе метода инженерных кейсов при подготовке инженерных кадров для предприятий оборонно-промышленного комплекса Москвы и Санкт-Петербурга // Вестник РАЕН. 2025. №2. С. 198–209. DOI 10.52531/1682-1696-2025-25-2-198-209. EDN: XXMQTK.
9. HAGEDORN L., RIEDELSHEIMER T., STARK R. Project-based learning in engineering education – developing digital twins in a case study. Proceedings of the Design Society. 2023. Vol. 3. P. 2975–2984. DOI 10.1017/pds.2023.298.
10. KNAP L., GRACZYKOWSKI C., HOLNICKI-SZULC J., WOŁEJSZA Z. Strategies for reduction of energy consumption during ascending and descending process of modern telescopic HAPS aerostats. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences. 2020. N 68(1). P. 155–168. DOI 10.24425/bpasts.2020.131833.
11. LAVADO-ANGUERA S., VELASCO-QUINTANA P.-J., TERRÓN-LÓPEZ M.-J. Project-Based Learning (PBL) as an Experiential Pedagogical Methodology in Engineering Education: A Review of the Literature. Education Sciences. 2024. N 14 (6). Article number: 617. DOI 10.3390/educsci14060617.
12. SASSON I., YEHUDA I., MALKINSON N. Fostering the skills of critical thinking and question-posing in a project-based learning environment, Thinking Skills and Creativity. 2018. Vol. 29. P. 203–212. DOI 10.1016/j.tsc.2018.08.001.
13. SHOYAMA T. Spin Air-launch of Small Rocket from Balloon. April 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/339127810_Spin_Air-launch_of_Small_Rocket_from_Balloon (дата обращения: 01.03.2025).
14. STEELE A.L. Experiential Learning in Engineering Education (1st ed.). CRC Press. 2023. DOI 10.1201/9781003007159.
15. ZHAO L., ZHAO B., CHUNMI L. Alignment analysis of teaching – learning-assessment within the classroom: how teachers implement project-based learning under the curriculum standards Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research. 2023. Vol. 5, Article number: 13. DOI 10.1186/s43031-023-00078-1.

REFERENCES

1. DROBOTENKO YU.B. Educational model «School – University – Enterprise» – a guarantee of quality education. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Gumanitarnye*

- issledovaniya*. 2015;3(7):97–99. EDN UGWCSL. (In Russian).
2. EROSHIN S.E., SHCHEGLOV D.K., FEDOROV D.A., AKSENOVA D.V., YURCHIKOVA Ya.V. Engineering cases in astronautics as an effective tool for career guidance among high school students. *Innovacii*. 2021;10(276):14–19. DOI 10.26310/2071-3010.2021.276.10.003. EDN BZKCYI. (In Russian).
 3. PODVYAZNIKOV M.L., BAUSHEV S.V. Realization and concept of restoring scientific schools at the enterprises of the defense-industrial complex. *Nauchnyy vestnik oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii*. 2021;4:86–95. DOI 10.52135/2410-4124_2021_4_86. EDN WHAHPE. (In Russian).
 4. SAIBEL A.G., BAUSHEV S.V., MATORINA D.YU. Engineering project as a tool for increasing youth engagement in astronautics. *Titovskie chteniya*. 2023;54–62. EDN MDDXFF. (In Russian).
 5. SHCHEGLOV D.K., EROSHIN S.E. Specifics of Strategic Development of Scientific and Educational Activities at High-Tech Industry Enterprises. *Innovacii*. 2021;9(275):9–13. DOI 10.26310/2071-3010.2021.275.9.002. EDN BSOMLA. (In Russian).
 6. SHCHEGLOV D.K., EROSHIN S.E., TIMOFEEV V.I., BUKAREV A.M. Project form of training as an effective mechanism of engineering personnel training. *Innovacii*. 2024;1(297):37–45. EDN LQSODA. (In Russian).
 7. SHCHEGLOV D.K., FEDOROV D.A., KONOVALCHIK A.P. Solving applied organizational and technical problems using the engineering case method. Saint Petersburg: BGТУ «ВОЕНМЕХ». 2019:63. ISBN 978-5-907054-83-7. (In Russian).
 8. SHCHEGLOV D.K., FEDOROV D.A., SAIBEL A.G., EROSHIN S.E., SAVELEV S.K. Analysis of the experience of implementing a project-based form of training based on the engineering case method in the training of engineering personnel for enterprises of the military-industrial complex of Moscow and St. Petersburg. *Vestnik RAEN*. 2025;2:198–209. DOI 10.52531/1682-1696-2025-25-2-198-209. EDN: XXMQTK. (In Russian).
 9. HAGEDORN L., RIEDELSHEIMER T., STARK R. Project-based learning in engineering education – developing digital twins in a case study. *Proceedings of the Design Society*. 2023; 3:2975–2984. DOI 10.1017/pds.2023.298.
 10. KNAP L., GRACZYKOWSKI C., HOLNICKI-SZULC J., WOLEJSZA Z. Strategies for reduction of energy consumption during ascending and descending process of modern telescopic HAPS aerostats. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2020;68(1):155–168. DOI 10.24425/bpasts.2020.131833.
 11. LAVADO-ANGUERA S., VELASCO-QUINTANA P-J, TERRÓN-LÓPEZ M-J. Project-Based Learning (PBL) as an Experiential Pedagogical Methodology in Engineering Education: A Review of the Literature. *Education Sciences*. 2024;14 (6). Article number: 617. DOI 10.3390/educsci14060617.
 12. SASSON I., YEHUDA I., MALKINSON N. Fostering the skills of critical thinking and question-posing in a project-based learning environment, *Thinking Skills and Creativity*. 2018; 29:203–212. DOI 10.1016/j.tsc.2018.08.001.
 13. SHOYAMA T. Spin Air-launch of Small Rocket from Balloon. April 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/339127810_Spin_Air-launch_of_Small_Rocket_from_Balloon (access date: 01.03.2025)
 14. STEELE A.L. *Experiential Learning in Engineering Education* (1st ed.). CRC Press. 2023. DOI 10.1201/9781003007159.
 15. ZHAO L., ZHAO B., CHUNMI L. Alignment analysis of teaching – learning-assessment within the classroom: how teachers implement project-based learning under the curriculum standards *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*. 2023;5. Article number: 13. DOI 10.1186/s43031-023-00078-1.

Щеглов Дмитрий Константинович,

к.т.н., доцент ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, доцент АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова, научный руководитель АО «НПО «Обуховский завод»

Федоров Дмитрий Александрович,

к.т.н., начальник лаборатории АО «Обуховский завод», доцент АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

Сайбель Алексей Геннадиевич,

д.т.н., доцент, профессор НОЦ АО «Обуховский завод», профессор ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

✉ 192012, г. Санкт-Петербург, пр-кт Обуховской Обороны, д. 120,
192012, St. Petersburg, Obukhovskaya Defense Ave., building 120
тел.: +7 (921) 448-59-58, e-mail: _dk@bk.ru

Савельев Сергей Константинович,

к.т.н., доцент ФГОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, старший научный сотрудник АО «НПО «Обуховский завод»

✉ 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1,
190005, St. Petersburg, 1st Krasnoarmeyskaya St., Bldg. 1,
тел.: +7 (812) 490-05-91, e-mail: bgту@voenmeh.ru

Ерошин Сергей Евгеньевич,

д.э.н., к.т.н., зам. директора АНО ДПО «НОЦ ВКО «Алмаз – Антей» им. акад. В.П. Ефремова

✉ 121357, Москва, Верейская ул., 41, с. 2,
121357, Moscow, Vereiskaya st., 41, building 2,
тел.: +7 (495) 231-70-40, e-mail: info@nocvko.ru