

Анализ параметров межорбитальных транспортных средств в миссиях Transporter

© Г.А. Щеглов, М.В. Тетерина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Российская Федерация

Представлены результаты анализа проектных параметров существующих малых межорбитальных транспортных средств (ОТВ), используемых при оказании периферийных пусковых услуг (LML) в совместных запусках малых космических аппаратов. Поскольку в настоящее время в России ниша рынка услуг LML еще не занята, данная задача является актуальной. В организациях, изучающих поставленную задачу, работы находятся на стадии определения требований к отечественным аппаратам ОТВ. Целью исследования является выявление и обобщение ключевых технических характеристик применяемых в настоящее время ОТВ на базе данных из открытых источников информации. Рассмотрены ОТВ, участвующие в Rideshare-миссиях Transporter на многоразовой ракете-носителе Falcon-9. Метод исследования основывается на структурировании и анализе значительного массива опубликованных данных. Представлены созданные коммерческими фирмами аппараты Sherpa, ION SCV, Vigoride, Orbiter, Chimera, Mira, Space Van, Optimus, Quark-lite. Определены осредненные значения проектных параметров ОТВ, которые могут быть использованы при формировании требований к отечественному аналогу. Отмечена высокая активность компаний-конкурентов по созданию проектов ОТВ. Проведенный анализ данных о результатах выполнения миссий показал, что разработка аппаратов связана с чрезвычайно высоким риском для частных фирм-разработчиков, так как только три из девяти рассмотренных буксиров продемонстрировали полностью успешные миссии.

Ключевые слова: периферийная пусковая услуга, совместный запуск спутников, миссии Transporter, межорбитальное транспортное средство, космический буксир, проектные параметры, обзор информации

Введение. С каждым годом возрастает число создаваемых малых космических аппаратов (МКА). Для их выведения на орбиту используется пусковая услуга специального вида — совместный запуск (англ. Rideshare Launch), при котором одна ракета-носитель (РН) используется для развертывания группы разнородных полезных нагрузок на одной-двух общих орбитах [1, 2]. Однако при оказании подобных пусковых услуг возникает ряд проблем. Во-первых, общая орбита может быть неудобна кому-либо из заказчиков. Во-вторых, одновременный запуск большого количества спутников осложняет их отслеживание. В-третьих, необходимо обеспечить безопасность отделяемых аппаратов, так как возрастает вероятность их столкновения в «облаке» на целевой орбите. Для решения указанных проблем актуально разделение пусковой услуги на центральную (ядерную) услугу, т. е. собственно доставку с помощью РН группы спутников

на общую орбиту, и периферийную услугу индивидуализации орбит спутников, называемую в зарубежной литературе Last Mile Logistic (LML), что переводится как «доставка последней мили» [3].

Актуальное средство оказания периферийных пусковых услуг МКА — малые межорбитальные транспортные средства (англ. Orbital Transfer Vehicles, OTV), к которым относятся разгонные блоки (upper stages), космические буксиры (space tug) и свободнолетающие космические платформы для запуска спутников (free flying satellite deployer). Хотя концепция OTV появилась еще до запуска первого искусственного спутника Земли [4], за рубежом сейчас наблюдается высокая активность коммерческих фирм-разработчиков аппаратов данного класса, предполагающих получить прибыль от предоставления услуг LML. В нашей стране ниша рынка услуг LML для МКА пока не занята. Организации, исследующие данную область, находятся на стадии определения проектных параметров и требований к такому аппарату [5]. В связи с этим актуальной задачей является анализ параметров существующих OTV.

Цель исследования — выявление и обобщение ключевых технических характеристик применяемых малых межорбитальных транспортных средств на основе данных из открытых источников информации.

Материалы и методы. Рассмотрены OTV, участвующие в Ride-share-миссиях Transporter на многоразовой РН Falcon-9. Предложенная компанией SpaceX в 2019 г., данная программа является одной из самых востребованной для выведения МКА. В зарубежных источниках, где рассматриваются полеты OTV, информация предоставляется дозированно. Метод исследования основывается на структурировании и анализе значительного массива опубликованных сведений, в частности, используются данные о маневрировании аппаратов, полученные со специализированных сайтов [6–10].

Анализ миссий Transporter. Результаты миссий Transporter (табл. 1) показывают, что за год реализуются два–четыре пуска. Дебютом стала миссия Transporter-1, стартовавшая в 2021 г. [11]. К настоящему времени уже совершено 13 успешных запусков, в ходе которых запущено более 1000 спутников [12, 13]. Число МКА, выведенных в одной миссии, варьируется в широких пределах — от 40 до 143 при среднем значении около 90 аппаратов.

Целевыми являются солнечно-синхронные орбиты (ССО) высотой 500...670 км и наклоном около 97°. Сведения, приведенные в табл. 1, отражают эволюцию центральной пусковой услуги: если в первых миссиях вторая ступень РН Falcon-9 формировала только одну рабочую орбиту, то в миссиях № 7 и четырех последних миссиях № 10–13 вторая ступень формирует уже две компланарные (разница в наклоне не превышает 0,4°) рабочие орбиты с разницей по высоте 75...170 км.

Данные миссий Transporter компании SpaceX

Номер миссии	Дата	ССО		Число КА	Число ОТВ	Название ОТВ
		H , км	i , град			
1	24.01.21	500	97,5	143	2	Sherpa-FX1, ION SCV-002
2	30.06.21	540	97,5	88	3	Sherpa-FX2, Sherpa-LTE1, ION SCV-003
3	13.01.22	525	97,5	105	2	Sherpa-LTC1*, ION SCV-004
4	01.04.22	532	97,5	40	1	ION SCV-005
5	25.05.22	525	97,5	59	3	Sherpa-AC1, ION SCV-006, Vigoride-3
6	3.01.23	525	97,5	114	5	Orbiter SN1, Vigoride-5, CHIMERA LEO 1, ION SCV-007, ION SCV-008
7	15.04.23	500 670	97,4 98,2	51	2	ION SCV-010, Vigoride-6
8	12.06.23	530	97,5	72	2	ION SCV-011, Orbiter SN3
9	11.11.23	530	97,5	113	3	ION SCV-013, LEO Express-1 / Mira SN 2, SpaceVan 001
10	04.03.24	515 590	97,5 97,8	53	2	Optimus-2, Quark-lite + Gluon
11	16.08.24	510 600	97,5 97,5	116	1	ION SCV-012
12	14.01.25	515 605	97,4 97,4	131	3	LEO Express-2 / Mira, ION SCV-014, ION SCV-016
13	15.03.25	500 600	97,4 97,8	74	1	ION SCV-017

* ОТВ снят с РН из-за утечки топлива.

Например, в миссии Transporter-10 вторая ступень выполнила свой первый запуск продолжительностью чуть менее 6 мин, чтобы выйти на эллиптическую опорную орбиту, а через 50 мин после запуска произвела короткое, продолжительностью 4 с, включение, чтобы выйти на первую круговую ССО высотой H приблизительно 510×520 км с наклоном $i = 97,45^\circ$. Более трех четвертей спутников были отделены на этой орбите через 53 мин после запуска. Через 1 ч 45 мин после запуска вторая ступень начала очередную последовательность из двух импульсов длительностью по 1 с, чтобы достичь

второй орбиты развертывания полезной нагрузки, находящейся на высоте примерно 590×600 км с наклоном 97,75°. Развертывание оставшихся спутников началось примерно через 2,5 ч после запуска, а когда они были выведены на орбиту, вторая ступень выдала тормозной импульс для схода с нее [14].

Параметры пусковой услуги Transporter близки к параметрам конкурирующей пусковой услуги, предоставляемой российскими кластерными запусками спутников на РН «Союз-2б» с разгонным блоком «Фрегат». Параметры трех крайних отечественных миссий, выполненных в 2023–2024 гг., приведены в табл. 2 [15, 16]. Отечественный носитель помимо целевой нагрузки выводил в среднем 40 малых полезных нагрузок (ПН), что можно считать вполне конкурентным показателем, учитывая, что РН Falcon-9 имеет вдвое большую грузоподъемность, чем РН «Союз-2». Параметры формируемых центральной пусковой услугой орбит двух миссий также близки. Разгонный блок «Фрегат» формирует две-три рабочие орбиты в диапазоне высот 450...820 км с разницей наклона плоскостей около 10°. Вторая ступень РН Falcon-9 в миссиях Transporter также начала выполнять функции разгонного блока: длительно находится на орбите (6 ч и более) и многократно включает двигатель (не менее пяти включений). Используемая для этих миссий ступень имеет усовершенствованную конструкцию. На корпусе данной модификации нанесена серая полоса, обеспечивающая пассивное терморегулирование топлива в баках. Можно ожидать дальнейшей модернизации этой ступени, с тем чтобы сформировать три рабочие орбиты.

Таблица 2

Характеристики российских кластерных миссий

№ COSPAR	Дата пуска	H , км	i , град	Число КА	Основная ПН
2023-091	27.06.23	809×816	98,8	1	«Метеор-М» № 2-3
		547×570	97,7	47	
		448×493	97,7	1	
				$\Sigma = 49$	
2024-039	29.02.24	812×823	98,6	1	«Метеор-М» № 2-4 «Марафон-Д» (макет)
		731×751	89,0	1	
		503×747	95,4	4	
		484×504	97,4	14	
				$\Sigma = 20$	
2024-199	05.11.24	820×822	98,8	2	«Ионосфера-М» № 1, 2
		583×603	97,4	12	
		482×507	97,4	41	
				$\Sigma = 55$	

Сравнение данных табл. 1 и 2 показывает, что возможность оказывать периферийные пусковые услуги LML с помощью малых ОТВ имеют пока только миссии Transporter, что дает им определенные конкурентные преимущества. На начало 2025 г. в миссиях Transporter было испытано девять различных конструкций ОТВ, разработанных частными фирмами. Технические характеристики ОТВ приведены в табл. 3 и 4, а компоновочные схемы представлены на рис. 1.

Как следует из данных табл. 1, в каждой миссии принимал участие хотя бы один космический буксир [17]. Всего было осуществлено 30 полетов буксиров. Максимальное количество ОТВ — пять аппаратов, было использовано в миссии Transporter-6 [18], средний показатель составил два ОТВ на миссию.

Таблица 3

Характеристики модификаций ОТВ Sherpa миссий Transporter

Параметр	FX	AC	LTE	LTC
Масса ОТВ, кг	120	120	203	140
Масса ПН, кг	180–190	55,9	212	40
Тип ДУ	Нет ДУ	Нет ДУ	ЭРД Холл	Химический
Тяга ДУ	–	–	22,4 мН	4·22 Н = 88 Н
I, м/с	–	–	11 080	3020
Г (РТ)	–	–	Ксенон	Изопропиловый спирт (IPA)
О	–	–	–	Высококонцентрированная перекись (НТР)
ΔV , м/с	–	–	До 1000	До 400
Длина, м	0,9 (1,7 с ПН)	0,9 (1,7 с ПН)	0,9 (1,7 с ПН)	0,9 (1,7 с ПН)
Ширина, м	0,9 (1,7 с ПН)	0,9 (1,7 с ПН)	0,9 (1,7 с ПН)	0,9 (1,7 с ПН)
Высота, м	0,5 (1,3 с ПН)	0,5 (1,3 с ПН)	0,5 (1,3 с ПН)	1,0 (1,8 с ПН)
Мощность системы энергопитания	2×LiO по 120–150 Вт·ч	6 СБ — 150 Вт 2×LiO по 120–150 Вт·ч 225 Вт (средняя) 600 Вт (пиковая)	6 СБ — 150 Вт 2×LiO по 120–150 Вт·ч 225 Вт (средняя) 600 Вт (пиковая)	6 СБ — 150 Вт 2×LiO по 120–150 Вт·ч 225 Вт (средняя) 600 Вт (пиковая)
<i>Примечания:</i> ПН — полезная нагрузка; I — удельный импульс; РТ — рабочее тело; Г — горючее; О — окислитель; СБ — солнечная батарея.				

Характеристики OTV миссий Transporter

Параметр	ION SCV	Vigoride	Orbiter	Chimera	Mira	Space Van	Optimus	Quark-lite
Масса OTV, кг	50	300 500	200	100	250 300	120 150	270	100
Масса ПН, кг	≤160	500 750	400	300	300/100	120 400	≤500	100 (Gluon)
Тип ДУ	X	ЭТ	X	XC	X	ЭРДХ	X	ЭТ
Тяга ДУ, Н	6×20	0,8	1330	?	8×26	4×7 мН	20	0,15
I , м/с	2850	6500	?	2950	2900	10000	2700	3500
Г (РТ)	C ₃ H ₆	H ₂ O	?	?	C ₂ H ₆	Xe	C ₃ H ₈	NH ₃
O	N ₂ O	–	N ₂ O	H ₂ O ₂	N ₂ O	–	N ₂ O	
ΔV , м/с	1000	2000	500	200	500 900	1000	?	750
Длина, м	0,7	1,2	1,2	0,82	0,9	0,69	1,0	1,0
Ширина, м	0,7	1,2	1,2	0,55 1,2	0,7 1,8 (с СБ)	1,08	1,5	1,0
Высота, м	1,0	0,4	0,5	0,6	1,0	0,4	1,5	0,5
Мощность СЭП, Вт	300	1800	?	50 800	300 500	400	500	500 1000
Число СБ	2	2	1	?	1	2	2	2

Примечания: ? — нет данных; пустая ячейка — данные не требуются; * — тип ДУ: X — химический; XC — химический, самовоспламеняющиеся компоненты; ЭТ — электротермический; ЭРДХ — электрореактивный на эффекте Холла; СЭП — система энергопитания; C₂H₆ — этан; C₃H₆ — пропилен; C₃H₈ — пропан; NH₃ — аммиак (жидкий); H₂O₂ — перекись водорода.

Компоновка космической головной части у миссий Transporter выполняется по многоярусной радиальной схеме, соответствующей идеологии адаптеров вторичной полезной нагрузки ESPA (Secondary Payload Adapter) [1, 19], разработанной в рамках программы «Усовершенствованная одноразовая ракета-носитель» (Evolved Expendable Launch Vehicle, EELV). При этом используются адаптеры полезной нагрузки различных конструкций (рис. 2). На рисунке хорошо видно, что OTV по своим габаритам существенно не отличаются от остальных МКА.

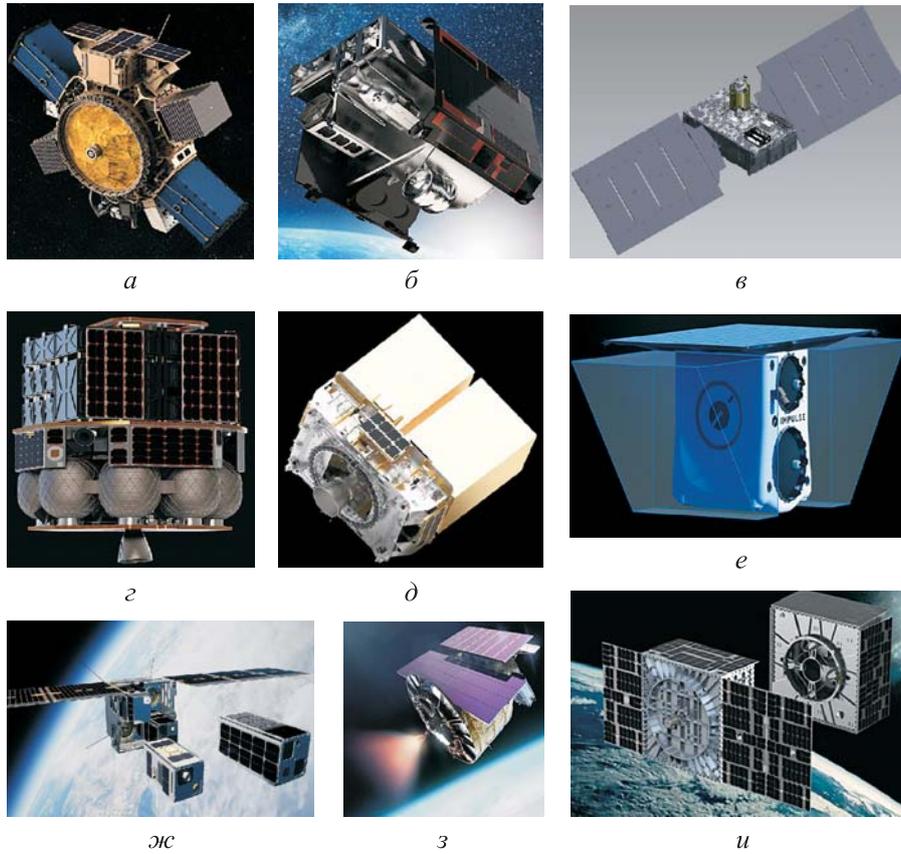


Рис. 1. Компоновка ОТВ:

а — Sherpa; *б* — ION SCV; *в* — Vigoride; *г* — Orbiter; *д* — Chimera; *е* — Mira;
ж — Space Van; *з* — Optimus; *и* — Quark-Lite

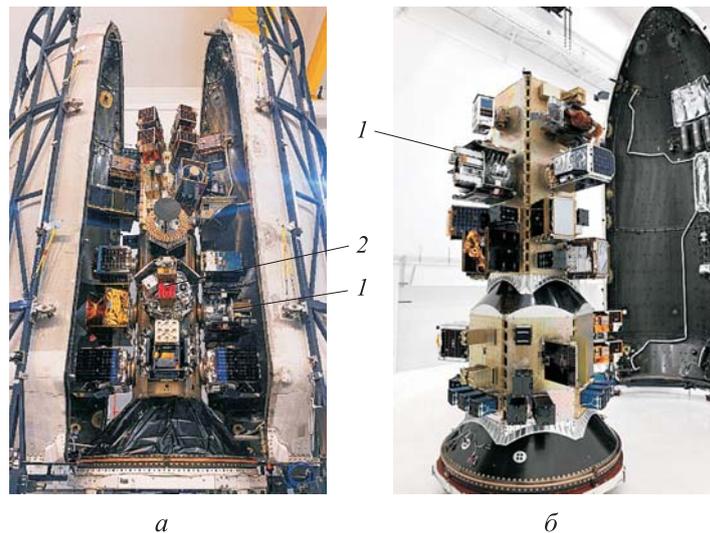


Рис. 2. Примеры компоновки ОТВ на космической головной части миссии Transporter:
а — Миссия № 8 [20]; *б* — Миссия № 11 [21]; 1 — ОТВ ION; 2 — ОТВ Orbiter

Компании, предоставляющие услугу LML, приобретают место на Transporter для своих OTV и предлагают комплексное решение LML, имеющее выгодную цену. Общая стоимость периферийной услуги делится между всеми клиентами OTV. В некоторых случаях, например для малых компаний-стартапов, такой подход будет менее затратным, чем покупка отдельного места на РН для своего МКА и выполнение всего комплекса работ на космодроме по подготовке к пуску. Следует также принять во внимание, что космический буксир выведет спутник на целевую орбиту, поэтому КА может сократить количество топлива или полностью отказаться от собственной ДУ, используя сэкономленную массу для своей ПН. Далее приведено краткое описание каждого из запущенных OTV.

OTV Sherpa (наименование получено от термина «шерпа» — местный тибетский проводник-носильщик, помогающий иностранцам взбираться на гималайские вершины) — модульная платформа для доставки спутников на индивидуальные орбиты, разработанная фирмой Spaceflight Inc. (США) [22] на базе упомянутого выше спутникового диспенсера ESPA [23]. Использованные в миссиях Transporter четыре модификации OTV, характеристики которых приведены в табл. 3, относятся ко второму поколению буксиров Sherpa-NG [24].

Модификация Sherpa-FX не является полноценным межорбитальным транспортным средством, так как в ней отсутствуют ДУ и система управления ориентацией [25]. Блок полезной нагрузки переводится на индивидуальную орбиту только за счет его торможения остаточной атмосферой. Платформа оборудована системой телеметрии Sherpa R2A-Core Comms, которая контролирует отделение аппаратов от платформы и передает данные по радиоканалу [26].

Модификация Sherpa-AC (Attitude Control) представляет собой свободнолетающую (free flying) усовершенствованную платформу, которая позволяет не только отделять полезные нагрузки, но и обеспечивать работу неотделяемого оборудования. Платформа не оснащена маршевой ДУ, но оборудована системой электропитания (солнечные панели и аккумуляторные батареи), средствами двусторонней радиосвязи, бортовым компьютером, системой контроля ориентации [27].

Модификация Sherpa-LTE (рис. 1, а) представляет собой полноценный OTV, оснащенный электрореактивным двигателем Apollo Constellation Engine (ACE) компании Apollo Fusion, который работает на эффекте Холла [28]. В полете ДУ использовалась в тестовом режиме для захоронения буксира после отделения всех ПН. Проведено более 800 успешных включений двигателя длительностью по 5 мин каждый [29].

Модификация Sherpa-LTC оснащена ДУ на базе четырех многорежимных ракетных двигателей малой тяги Ocelot компании Benchmark Space Systems [30, 31]. Двигатель может работать как на

одном компоненте — концентрированной перекиси водорода, так и на двух компонентах — концентрированной перекиси водорода и изопропиловом спирте. Данная модификация не была использована в полете, поскольку примерно за три недели до запуска компания Spaceflight обнаружила утечку топлива из ДУ, из-за чего аппарат был снят с миссии Transporter-3. Полет модификации Sherpa-LTC был успешно осуществлен 05.09.2022 г. в миссии Starlink Group 4-20 rideshare, и поэтому полет OTV Sherpa-LTC учтен в статистике полетов. Позже было заявлено, что компания SpaceX больше не будет сотрудничать с Spaceflight Inc. [32]. В 2023 г. компания Spaceflight Inc. была приобретена компанией Firefly Aerospace [33], так что сейчас OTV Sherpa практически перестали использовать.

OTV Vigoride (от англ. энергичный, бодрый) — это свободно-летающая космическая платформа (рис. 1, в) для запуска спутников (free flying satellite deployer), разработанная фирмой Momentus Inc. (США) при участии российских менеджеров. Изначально предполагалось, что Vigoride может быть запущена с адаптеров стандарта ESPA или из шлюзов МКС [34]. Значительный запас характеристической скорости должен был обеспечивать инновационный микроволновый электротермический двигатель малой тяги MET, работающий на воде [35–37]. Требуемая для работы этого двигателя электрическая мощность вырабатывалась двумя панелями СБ фирмы SpaceTech [38].

В ходе испытательного полета первый аппарат Vigoride-3 не смог развернуть СБ, что привело к ограничению связи. Из-за возникших проблем OTV отделило МКА со значительными задержками (28 мая, 18 июля, 30 июля, 30 августа 2022 г.) [39, 40]. Хотя пуск и был признан частично успешным, фирма была оштрафована из-за ввода инвесторов в заблуждение на основании того, что единственное испытание не доказывает коммерческую жизнеспособность проекта.

Vigoride-5 нес спутник Zeus 1, отделившийся 11 мая, и неотделяемую ПН для демонстрации технологий использования солнечной энергии. В ходе полета Vigoride-5 было проведено испытание двигателя MET, который произвел более 35 включений. В процессе миссии ДУ работали более 140 мин, продолжительность работы составила от 30 с до 6 мин. В результате космическому буксиру удалось поднять свою орбиту на 3 км (с учетом сопротивления остаточной атмосферы) [41].

Миссия Vigoride-6 предполагала выведение семи спутников. В процессе полета планировалось испытать новую СБ с ленточными пружинами (TASSA) [42] и выдать значительный импульс двигателем MET [43]. Однако, по данным каталога NORAD (ID56196), буксир не выполнял значительных маневров, что позволяет сделать вывод о проблемах с ДУ [44]. Об отделении всей ПН от буксира было объявлено 28 июля. В ноябре 2024 г. аппарат сошел с орбиты.

В настоящее время фирма Momentus Inc. испытывает значительные финансовые трудности, и новые полеты буксира Vigoride не планируются [45].

OTV Orbiter — орбитальный транспортный аппарат, разработанный фирмой Launcher (США) [46] для использования в качестве третьей ступени легкой ракеты-носителя или в качестве малого буксира на других РН [47]. В конструкции OTV (рис. 1, з) широко использовались металлические баки, ракетный двигатель малой тяги, корпуса датчиков и пр., полученные аддитивными технологиями фирмы Velo3D [48].

В первом полете Orbiter SN1 нес восемь ПН. В ходе полета возникла проблема управления ориентацией, вызванная неисправностью в антенной системе GPS [49]. После отделения от РН космический буксир в первые минуты, пока питание осуществлялось от батареи, связался с наземной станцией, но потом КА не смог сформировать нужную ориентацию, чтобы СБ начали генерировать энергию. В результате не получилось отделить ПН, и полет завершился аварийно. Между двумя полетами буксира в феврале 2023 г. фирма Launcher была приобретена фирмой Vast space [50].

Во втором полете Orbiter SN3 нес шесть ПН, в том числе демонстрационный космический аппарат Otter Pup, разработанный Starfish Space для тестирования технологий обслуживания спутников [51]. В запланированной миссии Otter Pup должен был отделиться от буксира и затем попытаться сблизиться с ним. Однако в системе управления буксиром возникла проблема с программным обеспечением, которая привела к закрутке аппарата со значительной угловой скоростью. В результате было принято решение о срочном отделении ПН, а полет был признан частично аварийным [52].

Фирма Launcher в 2024 г. планировала отправить Orbiter SN5 на Transporter-10, однако в настоящее время работа над OTV прекращена.

OTV Chimera (химера — мифическое животное, составленное из частей других животных) — буксир, разработанный фирмой Epic aerospace (США). Аппарат (рис. 1, д) был первым из семейства межорбитальных транспортных средств с унифицированной силовой установкой [53]. Поскольку, по данным каталога [8], буксир не был идентифицирован сразу после отделения, а позднее объекту CHIMERA LEO 1 был присвоен временный индекс NORAD 99209, данный аппарат либо вышел из строя (скорее всего), либо данные о нем закрыты.

OTV Mira (название миссии LEO express) — межорбитальный буксир, разработанный компанией Impulse Space (США), которую основал бывший глава двигательного отдела фирмы SpaceX. Таким образом, можно предположить, что фирма SpaceX инвестирует ресурсы в создание собственного эффективного OTV. Буксир использует двухкомпонентную ДУ на базе восьми двигателей Saiph [54]

собственной разработки с искровым воспламенением и имеет оригинальную компоновку (рис. 1, *e*): топливные баки расположены в центре машины, а ПН крепится по обеим сторонам для оптимизации центровки КА. Аппарат имеет неориентируемую панель СБ. Управление ориентацией осуществляется с помощью 16 двигателей на холодном газе, установленных по углам панели.

В ходе первого полета, длившегося девять месяцев, Miра успешно выполнила все задачи миссии, включая проведение автономных операций, построение ориентации на Солнце и установление связи с командным пунктом после отделения, развертывание полезной нагрузки заказчика — нескольких наноспутников формата CubeSat 3U. Этот OTV успешно осуществил ряд маневров с суммарным запасом характеристической скорости около 120 м/с: 19.03.2024 г. импульс по снижению орбиты на 30 км, равный 34 м/с, был создан восемью двигателями, работавшими в течение 60 с; 03.04.2024 г. импульс 43 м/с длительностью 75 с по увеличению высоты орбиты на 140 км был выполнен работой всех двигателей; 20.05.2024 г. импульсом около 40 м/с длительностью 62 с была снижена высота орбиты до первоначальной величины.

В ходе полета наблюдались проблемы со связью, которые в итоге и привели к завершению миссии. В целом миссия LEO Express-1, которая была спроектирована, построена и запущена менее чем за 15 месяцев, стала на сегодня лучшим дебютом в истории OTV [55].

Следующий полет буксира в миссии Transporter-12, начатый 14.01.2025 г., включает тестирование новых радиостанций, работающих в S- и X-диапазонах с двойным резервированием, и нового программного обеспечения. В настоящее время ПН успешно отделена, и аппарат проводит маневры с неотделяемой ПН [56].

OTV SpaceVan (космический фургон) — межорбитальный буксир, разработанный фирмой-производителем электрореактивных двигателей Exotrail (Франция) [57]. Этот буксир (рис. 1, *ж*), оснащен кластером из четырех электрореактивных двигателей ExoMG собственной разработки [30]. Космический аппарат построен на базе спутниковой платформы MP42 фирмы Nanoavionics [58].

Миссия SpaceVan 001, выполненная совместно с Французским космическим агентством (CNES) и другими организациями космического наблюдения и слежения (SST), признана успешной. Запущенный в ноябре 2023 г. в рамках миссии SpaceX Transporter 9, OTV Exotrail 6.03.2024 г. успешно вывел на орбиту спутник EXO-0 (CubeSat 8U), завершив демонстрацию своей периферийной пусковой услуги “SpaceDrop” [59]. В настоящее время аппарат находится в рабочем состоянии на орбите (NORAD ID 58295), которая постепенно снижается. На графике изменения высоты можно заметить отдельные ступенчатые этапы снижения высоты примерно на 300 м, которые

можно идентифицировать как управляемые маневры с включением двигателя малой тяги [60].

OTV Optimus — прототип КА орбитального обслуживания, разработанный фирмой Space Machines Company (Австралия). Optimus (рис. 1, з) был оснащен инерциальной навигационной системой Boreas X90 фирмы Advanced Navigation [61] и инновационными элементами бортового оборудования, в частности, камерами NEO Robotics Holmes Imager, гиперспектральным тепловизором Over The Rainbow фирмы Esper, бортовыми компьютерами SE-1 edge фирмы Spiral Blue, и ANT61, панелью СБ с гибкими фотоэлектрическими преобразователям фирмы CSIRO [62]. В двигательной установке был использован двухкомпонентный химический двигатель VS-1 фирмы Valiant Space [63]. Сведений об успешном завершении миссии Optimus-2 нет. Аппарат не идентифицирован при отделении от носителя в базе данных [8] и имеет временный идентификатор NORAD ID 98924. По некоторым данным, связь с аппаратом после отделения не установлена [64].

OTV Quark-Lite (миссия имеет название Meson-1) — прототип КА орбитального обслуживания, разработанный фирмой Atomos Space (США). Аппарат (рис. 1, и) создавался с использованием покупных общепромышленных компонентов (COTS-компонентов): коммерческих промышленных и автомобильных электронных блоков, модернизированных для эксплуатации в космосе [65]. Электротермическая двигательная установка APS 500, разработанная фирмой Electric propulsion laboratory Inc., использует жидкий аммиак, с самонадувом при давлении 0,86 МПа и температуре 20 °С. Аммиак выбран вследствие того, что он является экологически чистым топливом, замерзает при температуре –80 °С и не содержит продуктов конденсации, которые могли бы воздействовать на поверхность КА [66].

В данной миссии ПН является вспомогательный КА Gluon, который может быть сконфигурирован для размещения топлива для заправки Quark, хранения или размещения полезных грузов клиентов, а также как диспенсер запуска нескольких небольших КА [67]. Предполагалось, что пара аппаратов Quark/Gluon выполнят сближение, стыковку, дозаправку и маневрирование аналогично миссии аппаратов NEXTSat/ASTRO, осуществленной в 2007 г. по программе DARPA Orbital Express [68].

От носителя МКА были успешно отделены 04.03.2024 г., но далее возникли проблемы со связью и неконтролируемым вращением аппарата. Последнее сообщение о состоянии миссии датировано 20.03.2024 г. В настоящее время данных о ходе миссии нет, однако орбитальные параметры NORAD ID 59131 показывают стабильное снижение орбиты без существенных маневров, что может свидетельствовать о проблемах в реализации миссии [69].

OTV ION SCV (ION Satellite Carrier) — маневрирующая спутниковая платформа, разработанная фирмой D-Orbit (Италия) [70] на базе двигательного модуля D-Orbit D3 для удаления космического мусора [71]. Аппарат (рис. 1, б) предназначен для осуществления транспортных операций по запуску и фазированию малых и сверхмалых ПН. Его можно применять в составе РН различного класса; помимо испытанных Vega и Falcon-9, возможно использование «Союза», Ariane-6, PSLV, Long March 11 и 4B [72]. Кроме того, аппарат применяется как свободнолетающая платформа для неотделяемой полезной нагрузки. Ракетный двигатель малой тяги B20 фирмы Dawn Aerospacе на самовытесняемых газообразных компонентах топлива, используемый в ДУ, [73] может работать и со сгоранием компонентов, и на компонентах как на холодном газе, что увеличивает универсальность применения ДУ в качестве как маршевой, так и управляющей.

Оригинальная система ориентации и стабилизации использует наряду с реактивными двигателями гироскопы и магнитные катушки. Предусмотрены три системы радиосвязи: всенаправленные S и UHF диапазона и направленная X диапазона.

В настоящее время OTV ION SCV имеет наибольшую статистику полетов, которая приведена в табл. 5. Большинство OTV компании D-Orbit запускались в рамках миссий Transporter. Наряду с этими миссиями в табл. 5 указаны данные о полете первого буксира на европейском РН легкого класса Vega 3.09.2020 г. и о двух полетах на РН Falcon-9 вне миссий Transporter: ION SCV-009 в миссии Starlink Group 2–6 от 31.01.2023 г. и ION SCV-015 в полете Falcon 9 от 1.12.2023 г. Как следует из табл. 4, в миссиях № 6 и № 12 на орбиту было выведено сразу по два аппарата. Каждый из них помимо порядкового номера имеет приведенное в табл. 5 собственное имя, отличающееся от наименования миссии буксира, которое можно найти, например, на сайтах [74–77].

Из анализа данных табл. 5 следует, что масса ПН буксира лежит в пределах от 8 до 67 кг при среднем значении 42 кг (при заявленной максимальной массе ПН до 160 кг, см. табл. 4). Максимальная по массе ПН была выведена в миссии ION SCV-005, а максимальное количество спутников (21 аппарат) на одном буксире было запущено в миссии ION SCV-013. Полезные нагрузки буксира — наноспутники форм-фактора CubeSat и пикоспутники форм-фактора PocketQube [78]. Для этих спутников, которые, как правило, не имеют собственных ДУ, индивидуализация орбиты с помощью OTV оказалась крайне выгодной. Другой тип полезной нагрузки буксира — неотделяемые ПН [72], в качестве которых выступают перспективные элементы бортового оборудования, проходящие при этом летную квалификацию.

Данные о полезной нагрузке на OTV ION SCV

Номер, наименование ION SCV	Носитель; дата старта	Число КА	Полезная нагрузка		
			отделяемая *	неотделяемая	масса, кг
001 Lucas	Vega 30.09.20	12	Flock-4s (3U)	–	60
002 Laurentius	Transporter-1 24.01.21	20	Flock-4s (8×3U), SpaceBEE (12×0,5U),	ARGO DRAGO	45
003 Dauntless David	Transporter-2 30.06.21	6	Neptuno (3U), Spartan (6U) QMR-KWT (1U), ISILaunch35-D Deployer: W-Cube (3U), Ghalib (2U), NAPA 2/ RTAF-SAT 2 (6U)	LaserCube Nebula ADEO-N2	43
004 Elysian Eleonora	Transporter-3 13.01.22	6	DODONA (3U), LabSat (3U), STORK-1, -2 (3U) SWIFT (3U), VZLUSat-2 (3U)	Cloud platform ARCA Space	36
005 Almighty Alexius	Transporter-4 01.04.22	7	KSF-2A, -2B, -2C, -2D (6U), PlantSat (3U), SUCHAI-2, -3 (3U)	UP-box	67
006 Thrilling Thomas	Transporter-5 22.05.22	2	Guardian (6U), SBUDNIC (3U)	Crypto 1 Gen 01	21
007 Glorious Gratia	Transporter-6 03.01.23	1	Kelpie 1 (3U),	DRAGO-2 Cryptosat-2	8
008 Fierce Franciscus	Transporter-6 03.01.23	8	TAUSat 2 (2U), Sharjah Sat 1 (3U), Futura -SM1, -SM3 (3U), Astrocast-17, -18, -19, -20 (3U),	Genergo-2 Нераскрытый клиент	42
009 Eclectic Elena	Starlink Group 2–6 31.01.23	–	Satellite simulator	ADEO-N3 Bunny SD-1	13
010 Masterful Matthaeus	Transporter-7 15.04.23	5	VCub 1 (6U), Kepler-20, - 21 (6U), ELO 3 (6U), EPICHyper 1 (6U)	Scorpio MicroCMG	65

Номер, наименование ION SCV	Носитель; дата старта	Число КА	Полезная нагрузка		
			отделяемая *	неотделяемая	масса, кг
011 Savvy Simon	Transporter-8 12.06.23	11	EPICHyper 2 (6U), Outpost Mission 1 (3U), SpeiSat (3U), Kelpie-2 (3U), ELO-4 (6U), AlbaPod 6P (2 шт.): Istanbul (1P), MRC-100 (3P), URESAT-1 (1,5P), ROM-2 (1P), SATLLA-2I (2P), Unicorn-2I (3P)	NaviLEOTM ODIN-DU1 UKRI SWIMMR-1	60
012 Magnificent Monica	Transporter-11 16.08.24	5	Lemur 2 (4×3U), Sedna-1 (3U)	TetraPLEX RocketStar thruster	30
013 Ultimate Hugo	Transporter-9 11.11.23	21	Lemur-2 Nanaz (3U), Intuition-1 (6U), EPICHyper-3 (6U), PiCo-IoT (9×0,3U), Crypto 3 (3U), Ymir-1 (3U), OSW Cazoria (3U), AlbaPod 6P (2 шт.): ROM-3 (1.5P), Hydra-1 / HADES-D (1,5P), SpaceANT-D (1P), Tartan Artibeus-2 (1P), Unicorn-2J, -2K (3P)	Radiosat & Beamasat SD-2 Antelope GEN 03	59
014 Amazing Antonius	Transporter-12 14.01.25	8	LOGSATS-2 (3U) PoSAT-2 (3U)	MI: 2 (6U) Hitchhiker 1 K2 Space Component Mission AI-eXpress (два неизвестны)	X
015 Daring Diego	Falcon 9 01.12.23	8	ALISIO-1 (6U), LOGSATS (3U), NanoFF A, B (2U), AlbaPod 6P (2 шт.): Unicorn-2L, -2M, -2N (3P), MDQubesat-1 (2P))	MI:1 RECS Pono 1 Z01 SuperTorquer	36

Номер, наименование ION SCV	Носитель; дата старта	Число КА	Полезная нагрузка		
			отделяемая *	неотделяемая	масса, кг
016 Eminent Emmanuel	Transporter-12 14.01.25	4	AlbaPod 6P (2 шт.): SKYLINK-1, -2 (3P) HYPE AGH (1P) PROMETHEUS (1P) POQUITO (1P) HADES-R (1,5 P) HYDRA-T (1,5P)	Data DOT SWIMMR 2 неизвестен	
017 Marvelous Mathias	Falcon 9 15.03.25	11	HERMES Pathfinder (6x 3U) Alba Orbital (2 шт.): HADES-ICM/ icMercury (1.5P) HADES-W (1.5P) Unicorn-2O (3P) Unicorn-2P (3P) Unicorn-2Q (3P)	GO-2 propulsion system DARK propulsion demo DPhi Space ClusterGate1 Beyond Burials	38
<p><i>Примечание:</i> X — нет данных. * В скобках обозначены U — юнит форм-фактора CubeSat; P — юнит форм-фактора PocketQube; полужирным шрифтом выделены пусковые контейнеры.</p>					

Известные данные об орбитальных маневрах буксиров ION SCV приведены в табл. 6, где представлены Δh — суммарное изменение высоты орбиты, ΔV — реализованный запас характеристической скорости, а также параметры конечной орбиты (на указанные дату и время): e — эксцентриситет; r_p — радиус перигея, км; r_a — радиус апогея, км; T — период обращения, мин; i — наклонение орбиты, град; ω — аргумент перицентра, град.

Из анализа данных, представленных в табл. 6, следует, что в ходе маневров наклонение орбиты практически не изменялось (буксир ION SCV-009 был запущен в другую плоскость со спутниками Starlink). Маневры изменяли только высоту орбиты в среднем на 118 км при среднем реализованном импульсе 64 м/с. Наибольшее значение суммарного импульса в миссии ION SCV-011 составило 141 м/с. Данный запас характеристической скорости использовался на поддержание высоты орбиты и проведение нескольких маневров по ее изменению, что показано на рис. 3. Это является важной характеристикой, демонстрирующей надежность и эффективность работы аппарата, которая может оказаться ключевой в обеспечении долговременного функционирования OTV как свободнолетающих платформ и их взаимодействия с другими космическими системами в процессе орбитального обслуживания.

Данные маневров OTV ION SCV

№ ION	Δh , км	ΔV , км	e	H_p , км	H_a , км	T, мин	i , град	ω , град	Дата; время UTC получения данных орбиты
001	X	X	0,0005	517	524	95,0	97,5	215	4.09.20, 19:05
002	X	X	0,0010	523	536	95,2	97,5	198	03.02.21, 15:48
003	X	X	0,0011	521	536	95,2	97,5	204	05.07.21, 14:49
004	X	X	0,0010	522	536	95,2	97,5	215	18.01.22, 23:26
005	151	86	0,0009	497	510	94,7	97,4	261	06.04.22, 12:44
006	31	18	0,0011	520	536	95,2	97,5	206	01.06.22, 13:30
007	89	51	0,0018	518	543	95,3	97,5	178	18.01.23, 03:39
008	67	35	0,0016	517	539	95,2	97,5	169	18.01.23, 17:53
009	X	X	0,0008	324	335	91,1	70,0	246	07.02.23, 14:53
010	94	57	0,0009	494	507	94,6	97,4	219	18.04.23, 16:17
011	258	141	0,0014	517	536	95,2	97,5	184	20.06.23, 17:51
012	X	X	0,0004	593	598	96,4	97,7	20	19.01.25, 05:40
013	165	79	0,0012	515	531	95,1	97,5	202	28.11.23, 16:12
014	24	12	X	562	568	97,8	97,5	X	22.03.25, 21:17
015	91	52	0,0012	554	569	95,7	97,6	177	20.09.24, 13:32
016	102	58	X	380	565	93,9	97,5	X	22.03.25, 20:53
017	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Примечание: X — нет данных (для ION SCV-017 нет данных на момент опубликования статьи).

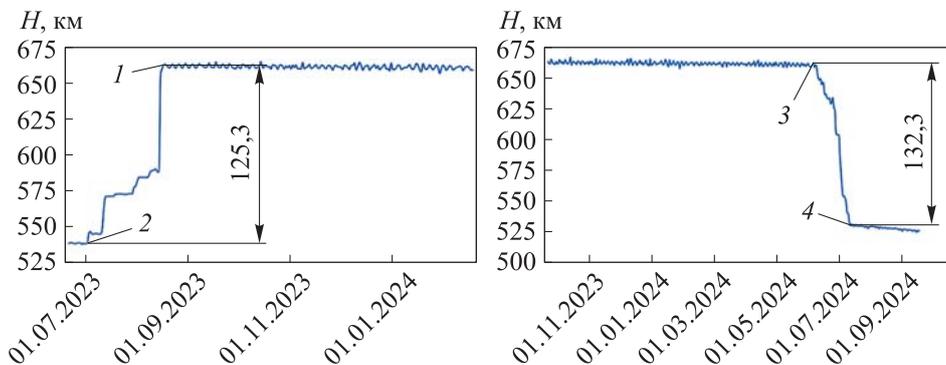


Рис. 3. Орбитальные маневры ION SCV-011 по данным [79], выполнены: 1 — 17.08.2023; 2 — 02.07.2023; 3 — 08.07.2024; 4 — 14.07.2024

Заключение. Анализ тактико-технических характеристик буксиров межорбитальных транспортных средств (OTV) позволяет сделать вывод, что эти аппараты имеют следующие осредненные характеристики: массу около 200 кг; массу ПН около 350 кг; отношение массы ПН к собственной массе OTV в пределах от 1,0 до 3,0; тяговооруженность менее 0,05 при удельном импульсе маршевой ДУ

на нетоксичных компонентах топлива около 2980 м/с. Усредненные габариты аппарата составляют 1,0 м по каждому измерению. Таким образом удельная плотность компоновки буксира с ПН можно оценить как 200 кг/м³.

Анализ проектов показал, что разработка OTV происходит в условиях чрезвычайно высоких рисков для частных компаний. В настоящее время вероятность успеха проекта малого межорбитального буксира в миссиях Transporter составляет не более 1/3, так как из девяти рассмотренных буксиров только ION SCV, Mira и SpaceVan продемонстрировали полностью успешные миссии. Остальные аппараты столкнулись с отказами техники, в числе которых нештатная работа ДУ, системы электропитания, системы управления и связи. Следовательно, для создания буксира требуется большой объем мероприятий по обеспечению надежности.

Как правило, первая же авария буксира влечет за собой существенные убытки и фактически означает прекращение бизнеса фирмы-стартапа с переходом наработанной интеллектуальной собственности к другой компании. В то же время выполнение проектов малых межорбитальных средств — показательный пример организации конкурентной борьбы частных предпринимателей, решающих актуальные проблемы космонавтики. Силами коммерческих фирм-стартапов удается накопить значительный объем интеллектуальной собственности, аккумулируемый более успешным бизнесом, который повышает научно-технологический потенциал государства.

Следует также отметить намечающуюся конкурентную борьбу американской фирмы SpaceX с итальянской фирмой D-Orbit. Очевидный успех буксира ION SCV побудил разработчика PH Falcon-9 создать собственную дочернюю фирму для создания аналогичного продукта. Успешные полеты буксира Mira показывают (на фоне неудач других частных фирм), что в разработку аппарата вложены значительные интеллектуальные, научные и технологические ресурсы. На этом фоне отсутствие российского малого коммерческого буксира наносит ущерб конкурентоспособности отечественных миссий совместных пусков.

Полученные в результате проведенного исследования осредненные технические характеристики буксира могут быть использованы для формирования требований к отечественному малому разгонному блоку БОТ.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития передовой инженерной школы «Системная инженерия ракетно-космической техники» МГТУ им. Н.Э. Баумана

ЛИТЕРАТУРА

- [1] SMD Rideshare 101. Revision: Rideshare 101_v9_Final. *NASA*, 2020. URL: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/rideshare-101-final.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [2] Guerrieri G. Dedicated, Rideshare and Piggyback. *Impulso.space*. 01.07.2023 URL: <https://impulso.space/tools/blog/posts/dedicated-rideshare-piggyback> (дата обращения: 12.01.2025).
- [3] Space Logistics Markets. 1st Edition, 2022. *Euroconsult*. URL: <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/space-logistics-markets/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [4] Milenovic M. *What are Orbital Transfer Vehicles (Space Tugs)?* URL: <https://matijamilenovic.medium.com/what-are-orbital-transfer-vehicles-space-tugs-a48288e4939c> (дата обращения: 12.01.2025).
- [5] Щеглов Г.А., Шаповалов А.В. Выбор двигательной установки перспективного малого разгонного блока. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 8. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2200>
- [6] Satellite Catalog (SATCAT). *CelesTrak* URL: <https://celestrak.org/satcat/search.php> (дата обращения: 12.01.2025).
- [7] *SatNOGS DB*. URL: <https://db.satnogs.org> (дата обращения: 12.01.2025).
- [8] *N2YO*. URL: <https://www.n2yo.com> (дата обращения: 12.01.2025).
- [9] *Libre Space Community*. URL: <https://community.libre.space> (дата обращения: 12.01.2025)
- [10] *Orbital Focus*. URL: <http://orbitalfocus.uk> (дата обращения: 12.01.2025).
- [11] Wattles J. SpaceX launches 143 satellites on one rocket in record-setting mission. *CNN* URL: <https://www.cnn.com/2021/01/24/tech/spacex-rideshare-transporter-mission-scn/index.html> (дата обращения: 12.01.2025).
- [12] Foust J. SpaceX launches Transporter-11 smallsat rideshare mission. *SpaceNews* URL: <https://spacenews.com/spacex-launches-transporter-11-smallsat-rideshare-mission/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [13] Lentz D. SpaceX Transporter-12 launches more than 100 satellites. 2025 *NASA* URL: <https://www.nasaspaceflight.com/2025/01/transporter-12/> (дата обращения: 19.01.2025).
- [14] Lentz D. SpaceX launches Transporter-10 rideshare from Vandenberg. *NASA* URL: <https://www.nasaspaceflight.com/2024/03/transporter-10> (дата обращения: 12.01.2025).
- [15] McDowell J. *Space Activities in 2024*. 2025 Jan 2 Rev 1.2 URL: <https://planet4589.org/space/papers/space24.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [16] McDowell J. *Space Activities in 2023*. 2024 Jan 15 Rev 1.4 URL: <https://planet4589.org/space/papers/space23.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [17] Sesnic T. Transporter-1 | Falcon 9 Block 5. *Everyday Astronaut*. URL: <https://everydayastronaut.com/transporter-1-falcon-9-block-5/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [18] DeSisto A. Transporter-6 | Falcon 9 Block 5. *Everyday Astronaut*. URL: <https://everydayastronaut.com/transporter-6-falcon-9-block-5-2/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [19] ESPA user's guide. The EELV secondary payload adapter. *MOOG*. URL: <https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/sdg/space/structures/moog-espa-users-guide-datasheet.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [20] Volosin J.I.M. Transporter-8 | Falcon 9 Block 5. *Everyday Astronaut*.

- URL: <https://everydayastronaut.com/transporter-8-falcon-9-block-5-2/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [21] *NASA spaceflight*. URL: <https://www.nasaspaceflight.com/wp-content/uploads/2024/08/T11-stack2.jpg> (дата обращения: 12.01.2025).
- [22] *Small Satellite 2012. Spaceflight Secondary Payload System (SSPS) and SHERPA Tug – A New Business Model for Secondary and Hosted Payloads*. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/aa57/a7365cdc773a7a2ef5e24160e46a37f90816.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [23] Haskett S.A., Doggrel L.J. EELV Secondary Payload Adapter (ESPA). *13th AIAA/USU Conference on Small Satellites*. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2183&context=smallsat> (дата обращения: 12.01.2025).
- [24] McKenzie P. Sherpa OTV Program Update. Presented to SPRSA, 2022. *SPRSA* URL: <https://www.sprsa.org/sites/default/files/inline-images/gSvoqApsLE3DOLSvg5ao0JW9HSzrzTIKJnsGzj6SVy2EUZCixv.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [25] Sherpa-FX. *Gunter's Space Page*. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sherpa-fx.htm (дата обращения: 12.01.2025).
- [26] Request for special temporary authority. *Spaceflight Inc.* URL: <https://fcc.report/IBFS/SAT-STA-20210205-00017/3870545.pdf> (дата обращения: 12.01.2025).
- [27] Sherpa-AC. *Gunter's Space Page*. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sherpa-ac.htm (дата обращения: 12.01.2025).
- [28] Apollo Constellation Engine (ACE) krypton/xenon propulsion system. *Apollo Fusion*. Version 02. Released: 06 Aug 2020. URL: https://satcatalog.s3.amazonaws.com/components/975/SatCatalog_-_Apollo_Fusion_-_ACE_-_Datasheet.pdf?lastmod=20210710023614 (дата обращения: 12.01.2025).
- [29] Gill M. On-Orbit Validation of the Astra Spacecraft Engine™, 2022. *Astra* URL: <https://astra.com/news/on-orbit-validation-of-the-astra-spacecraft-engine/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [30] In-Space Propulsion. State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology. *NASA* URL: https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/in-space_propulsion/ (дата обращения: 12.01.2025).
- [31] Sherpa-LTE. *Gunter's Space Page*. URL: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sherpa-lte.htm (дата обращения: 12.01.2025).
- [32] Rainbow J. Spaceflight's chemically powered space tug heads for launch. 2022. *SpaceNews* URL: <https://spacenews.com/spaceflights-chemically-powered-space-tug-heads-for-launch/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [33] *Firefly Aerospace Announces Strategic Acquisition of Spaceflight Inc. to Bolster On-Orbit Services* URL: <https://fireflyspace.com/news/firefly-aerospace-announces-strategic-acquisition-of-spaceflight-inc-to-bolster-on-orbit-services/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [34] Investor presentation. 2020. *Momentum* URL: https://momentus.space/wp-content/uploads/2020/12/Momentum_Featured-Investor-Presentation_December-2020.pdf (дата обращения: 12.01.2025).
- [35] Brandenburg J.E., Kline J., Sullivan, D. The microwave electro-thermal (MET) thruster using water vapor propellant. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33 (2), pp. 776–782. DOI: 10.1109/tps.2005.845252
- [36] Hummelt J., Podolsky V., Gascon N. *Pierced waveguide thruster*. Patent US11585331B2. 2021.

- [37] Hummelt J., Sercel J., Mainwaring P., Small J., Parman M. *Spacecraft propulsion devices and systems with microwave excitation*. Patent US11527387B2. 2021.
- [38] STI solar arrays with multi-hinge deployment mechanism ready to fly. 2020. *SpaceTech-I* URL: <https://spacetech-i.com/news/news-details/sti-solar-arrays-with-multi-hinge-deployment-mechanism-ready-to-fly> (дата обращения: 12.01.2025).
- [39] Todd D. *Seven satellites trapped on Vigoride-3 (VR-3) after power fault*. 2022. URL: <https://www.seradata.com/vigoride-3-vr-3-satellite-delivery-spacecraft-has-power-fault-that-meant-only-two-of-its-nine-sat-passengers-got-out/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [40] *Launches and Orbital Operations. 2022 — Launches to Orbit and Beyond*. URL: <https://orbitalfocus.uk/Diaries/Launches/Launches.php?year=2022> (дата обращения: 12.01.2025).
- [41] Foust J. *Momentum tug raises orbit with water-fueled thruster*. 2023. *SpaceNews* URL: <https://spacenews.com/momentum-tug-raises-orbit-with-water-fueled-thruster/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [42] Wilson L., Celano L., Arustamov G., Park J., Wong D. *Rollable tape spring solar array*. Patent US11936335B2. 2021.
- [43] *Momentum Launches Vigoride-6 Orbital Service Vehicle on SpaceX Transporter-7 Mission*. *Momentum* URL: <https://investors.momentum.space/news-releases/news-release-details/momentum-launches-vigoride-6-orbital-service-vehicle-spacex/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [44] NORAD. Apogee. Perigee. Eccentricity. 56196/Vigoride-6. *CelesTrak* URL: <https://celestrak.org/NORAD/elements/graph-altitude.php?CATNR=56196> (дата обращения: 12.01.2025).
- [45] Компания Momentum не сможет выполнить следующую миссию из-за нехватки средств. *Kosmicheskaya Lenta*. URL: <https://kosmolenta.com/index.php/2153-2023-01-17-momentum-mori> (дата обращения: 12.01.2025).
- [46] *Launcher*. URL: <https://www.launcherspace.com/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [47] *Orbiter (web archive)*. URL: <https://web.archive.org/web/20230613215501/https://www.launcherspace.com/orbiter> (дата обращения: 12.01.2025).
- [48] Case study. Improving Critical Rocket Engine Performance with Advanced Metal AM. *Velo 3D*. URL: https://velo3d.com/wp-content/uploads/2022/05/Improving-Critical-Rocket-Engine-Performance-Launcher-Case-Study.pdf?_t=1723047874 (дата обращения: 12.01.2025).
- [49] Орбитальный транспортный корабль Orbiter SN1 вышел из строя. *Dzen* URL: https://dzen.ru/a/Y_Sw6Nw2ykiZvzH- (дата обращения: 12.01.2025).
- [50] *Vast space*. URL: <https://www.vastspace.com/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [51] *Starfish space*. URL: <https://www.starfishspace.com/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [52] Foust J. *Second Orbiter transfer vehicle malfunctions*. 2023. *SpaceNews* URL: <https://spacenews.com/second-orbiter-transfer-vehicle-malfunctions/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [53] *An OTV for every mission. Epic aerospace*. URL: <https://epic-aerospace.com/spacecraft> (дата обращения: 12.01.2025).
- [54] *Impulse space qualifies the Saiph thruster ahead of first flight. Impulse space*. URL: <https://www.impulsespace.com/updates/impulse-space-qualifies-the-saiph-thruster-ahead-of-first-flight> (дата обращения: 12.01.2025).
- [55] *LEO Express-1 Mission Updates. Impulse space*. URL: <https://www.impulsespace.com/updates/leo-express-1> (дата обращения: 12.01.2025).
- [56] *LEO Express-2 Mission Updates. Impulse space*.

- URL: <https://www.impulspace.com/updates/leo-express-2-mission-updates> (дата обращения: 19.01.2025)
- [57] End-to-end space mobility. *Exotrail*. URL: <https://www.exotrail.com> (дата обращения: 12.01.2025).
- [58] Microsatellite Bus MP42. *Nanoavionics*. URL: <https://nanoavionics.com/small-satellite-buses/microsatellite-bus-mp42/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [59] Weltman A. Exotrail Completes First In-Orbit Delivery with SpaceVan Orbital Transfer Vehicle. 2024. *Satellitetoday*. URL: <https://www.satellitetoday.com/launch/2024/03/11/exotrail-completes-first-in-orbit-delivery-with-spacevan-orbital-transfer-vehicle/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [60] NORAD. Orbit Data. 58295/SpaceVan-001. *CelesTrak* URL: <https://celestrak.org/NORAD/elements/graph-orbit-data.php?CATNR=58295> (дата обращения: 12.01.2025).
- [61] Roadside Assistance in Space: The Launch of Optimus and Boreas X90. *Advanced Navigation*. URL: <https://www.advancednavigation.com/case-studies/roadside-assistance-in-space-the-launch-of-optimus-and-boreas-x90/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [62] Australia's largest private satellite reaches orbit. *Space.gov* URL: <https://www.space.gov.au/news-and-media/australias-largest-private-satellite-reaches-orbit> (дата обращения: 12.01.2025).
- [63] VS-1. 20N bipropellant thruster. *Valiant space*. URL: <https://www.valiantspace.com/vs1> (дата обращения: 12.01.2025).
- [64] *NASA spaceflight forum*. URL: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=58042.240> (дата обращения: 12.01.2025).
- [65] Atomos 2023 in Review. *Atomos*. URL: <https://www.atomosspace.com/blogs/atomos-2023-in-review> (дата обращения: 12.01.2025).
- [66] Resistojet Propulsion Systems. *Electric propulsion laboratory*. URL: <https://electricpropulsionlab.com/resistojet-propulsion-systems/> (дата обращения: 12.01.2025).
- [67] Atomos space. Mission 1. *Atomos*. URL: <https://www.atomosspace.com/blogs/mission-1> (дата обращения: 12.01.2025).
- [68] Orbital Express Space Operations Architecture. *Web archive*. URL: <https://web.archive.org/web/20070313165744/http://www.darpa.mil/tto/program/s/oe.htm> (дата обращения: 12.01.2025).
- [69] Mission updates. *Atomos*. URL: <https://www.atomosspace.com/blogs/updates> (дата обращения: 17.01.2025).
- [70] Space logistics and orbital transportation services. *D-Orbit*. URL: <https://www.dorbit.space> (дата обращения: 17.01.2025).
- [71] Deorbit Systems. State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology. *NASA*. URL: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems/> (дата обращения: 17.01.2025).
- [72] ION hosted payload services. *D-Orbit*. URL: <https://www.dorbit.space/media/1/12.pdf> (дата обращения: 17.01.2025).
- [73] *B20 thruster. Dawn Aerospace*. 2024. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5e82736a5e6bb91e8af13ea7/t/65f2f1bb1022ad42c5a1b9c7/1710420438495/DA05.02+B20+Thruster+Brochure+20240301.pdf> (дата обращения: 17.01.2025).
- [74] Missions. *D-orbit*. URL: <https://www.dorbit.space/mission-updates> (дата обращения: 17.01.2025).
- [75] ION Satellite Carrier. *Missions*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ION_Satellite_Carrier (дата обращения: 17.01.2025).
- [76] Endless sky mission booklet. *D-Orbit*. URL:

- file:///C:/Users/Egor/Downloads/Endless%20Sky%20Mission%20Bookletpdf.pdf
(дата обращения: 19.01.2025)
- [77] Ascend mission booklet. *D-Orbit*.
URL: file:///C:/Users/Egor/Downloads/Ascend%20Mission%20Bookletpdf.pdf
(дата обращения: 19.01.2025)
- [78] *The PocketQube Standard*. Issue 1. 2018.
URL: <https://static1.squarespace.com/static/53d7dcde4b07a1cdbbc08a4/t/5b34c395352f5303fcec6f45/1530184648111/PocketQube+Standard+issue+1+-+Published.pdf> (дата обращения: 17.01.2025).
- [79] ION SCV-011. *ISS Tracker*. URL: <https://isstracker.pl/en/satelite/56957> (дата обращения: 17.01.2025).

Статья поступила в редакцию 14.01.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Щеглов Г.А., Тетерина М.В. Анализ параметров межорбитальных транспортных средств в миссиях Transporter. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 3. EDN TIIRFG

Щеглов Георгий Александрович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области динамики конструкций аэрокосмических систем. e-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru

Тетерина Мария Вячеславовна — студентка 5-го курса кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: mariya10341@yandex.ru

Analysis of the orbital transfer vehicle parameters in the Transporter missions

© G.A. Shcheglov, M.V. Teterina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

The paper presents results of analyzing design parameters of the existing small orbital transfer vehicle (OTV) used to provide the lightweight multiple launcher (LML) services in the small spacecraft rideshare launches. This task is relevant, since the LML services market niche in Russia is currently unoccupied. Organizations researching this area stay at the stage of defining requirements for the domestic OTVs. The study objective includes identifying and summarizing the key technical characteristics of the currently used OTVs based on the open source data. The paper considers OTVs used in the Transporter rideshare missions with the Falcon 9 reusable launch vehicle. The research method is based on structuring and analyzing a significant array of the published data. The following commercially developed vehicles are considered: Sherpa, ION SCV, Vigoride, Orbiter, Chimera, Mira, Space Van, Optimus, and Quark-lite. Average values of the OTV design parameters are determined, which could be used to formulate requirements for a domestic analogue. The paper shows high activity of the competing companies in the OTV projects design and development. The conducted analysis of data on results of the missions demonstrates that the vehicle design and development is associated with an extremely high risk for a private developer. As of today, only three out of nine considered tugs demonstrate the completely successful missions.

Keywords: LML service, rideshare launch, Transporter missions, orbital transfer vehicle, space tug, design parameters, information review

The work was prepared within the frames of implementing the Program for Development of the Advanced Engineering School "System Engineering of the Rocket and Space Technology" at the Bauman Moscow State Technical University.

REFERENCES

- [1] SMD Rideshare 101. Revision: Rideshare 101_v9_Final. NASA, 2020. Available at: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/09/rideshare-101-final.pdf> (accessed January 12, 2025).
- [2] Guerrieri G. Dedicated, Rideshare and Piggyback. *Impulso.space*. 01.07.2023. Available at: <https://impulso.space/tools/blog/posts/dedicated-rideshare-piggyback> (accessed January 12, 2025).
- [3] Space Logistics Markets. 1st Edition, 2022. *Euroconsult*. Available at: <https://digital-platform.euroconsult-ec.com/product/space-logistics-markets/> (accessed January 12, 2025).
- [4] Milenovic M. *What are Orbital Transfer Vehicles (Space Tugs)?* Available at: <https://matijamilenovic.medium.com/what-are-orbital-transfer-vehicles-space-tugs-a48288e4939c> (accessed January 12, 2025).
- [5] Shcheglov G.A., Shapovalov A.V. Vybór dvigatelnoy ustanovki perspektivnogo razgonnogo bloka [The selection of the propulsion system of an advanced small space tug]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 8. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-8-2200>
- [6] Satellite Catalog (SATCAT). *CelesTrak*. Available at: <https://celestrak.org/satcat/search.php> (accessed January 12, 2025).

- [7] *SatNOGS DB*. Available at: <https://db.satnogs.org> (accessed January 12, 2025).
- [8] *N2YO*. Available at: <https://www.n2yo.com> (accessed January 12, 2025).
- [9] *Libre Space Community*. Available at: <https://community.libre.space> (accessed January 12, 2025).
- [10] *Orbital Focus*. Available at: <http://orbitalfocus.uk> (accessed January 12, 2025).
- [11] Wattles J. SpaceX launches 143 satellites on one rocket in record-setting mission. *CNN*. Available at: <https://www.cnn.com/2021/01/24/tech/spacex-rideshare-transporter-mission-scen/index.html> (accessed January 12, 2025).
- [12] Foust J. SpaceX launches Transporter-11 smallsat rideshare mission. *SpaceNews*. Available at: <https://spacenews.com/spacex-launches-transporter-11-smallsat-rideshare-mission> (accessed January 12, 2025).
- [13] Lentz D. SpaceX Transporter-12 launches more than 100 satellites. 2025. *NASA*. Available at: <https://www.nasaspaceflight.com/2025/01/transporter-12/> (accessed January 19, 2025).
- [14] Lentz D. SpaceX launches Transporter-10 rideshare from Vandenberg. *NASA*. Available at: <https://www.nasaspaceflight.com/2024/03/transporter-10> (accessed January 12, 2025).
- [15] McDowell J. *Space Activities in 2024*. 2025 Jan 2 Rev 1.2. Available at: <https://planet4589.org/space/papers/space24.pdf> (accessed January 12, 2025).
- [16] McDowell J. *Space Activities in 2023*. 2024 Jan 15 Rev 1.4. Available at: <https://planet4589.org/space/papers/space23.pdf> (accessed January 12, 2025).
- [17] Sesnic T. Transporter-1 | Falcon 9 Block 5. *Everyday Astronaut*. Available at: <https://everydayastronaut.com/transporter-1-falcon-9-block-5/> (accessed January 12, 2025).
- [18] DeSisto A. Transporter-6 | Falcon 9 Block 5. *Everyday Astronaut*. Available at: <https://everydayastronaut.com/transporter-6-falcon-9-block-5-2/> (accessed January 12, 2025).
- [19] ESPA user's guide. The EELV secondary payload adapter. *MOOG*. Available at: <https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/sdg/space/structures/moog-espas-users-guide-datasheet.pdf> (accessed January 12, 2025).
- [20] Volosin J.I.M. Transporter-8 | Falcon 9 Block 5. *Everyday Astronaut*. Available at: <https://everydayastronaut.com/transporter-8-falcon-9-block-5-2/> (accessed January 12, 2025).
- [21] *NASA spaceflight*. Available at: <https://www.nasaspaceflight.com/wp-content/uploads/2024/08/T11-stack2.jpg> (accessed January 12, 2025).
- [22] *Small Satellite 2012. Spaceflight Secondary Payload System (SSPS) and SHERPA Tug — A New Business Model for Secondary and Hosted Payloads*. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/aa57/a7365cdc773a7a2ef5e24160e46a37f90816.pdf> (accessed 1January 12, 2025).
- [23] Haskett S.A., Doggrell L.J. EELV Secondary Payload Adapter (ESPA). In: *13th AIAA/USU Conference on Small Satellites*. Available at: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2183&context=smallsat> (accessed January 12, 2025).
- [24] McKenzie P. Sherpa OTV Program Update. Presented to SPRSA, 2022. *SPRSA*. Available at: <https://www.sprsa.org/sites/default/files/inline-images/gSvoqApsLE3DOLSvg5ao0JW9HSzrzTIKJnsGzj6SVy2EUZCixv.pdf> (accessed January 12, 2025).
- [25] Sherpa-FX. *Gunter's Space Page*. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sherpa-fx.htm (accessed January 12, 2025).
- [26] Request for special temporary authority. *Spaceflight Inc*. Available at: <https://fcc.report/IBFS/SAT-STA-20210205-00017/3870545.pdf> (accessed January 12, 2025).

- [27] Sherpa-AC. *Gunter's Space Page*. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sherpa-ac.htm (accessed January 12, 2025).
- [28] Apollo Constellation Engine (ACE) krypton/xenon propulsion system. *Apollo Fusion*. Version 02. Released: 06 Aug 2020. Available at: https://satcatalog.s3.amazonaws.com/components/975/SatCatalog_-_Apollo_Fusion_-_ACE_-_Datasheet.pdf?lastmod=20210710023614 (accessed January 12, 2025).
- [29] Gill M. On-Orbit Validation of the Astra Spacecraft Engine™. 2022. *Astra*. Available at: <https://astra.com/news/on-orbit-validation-of-the-astra-spacecraft-engine/> (accessed January 12, 2025).
- [30] In-Space Propulsion. State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology. *NASA*. Available at: https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/in-space_propulsion/ (accessed January 12, 2025).
- [31] Sherpa-LTE. *Gunter's Space Page*. Available at: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sherpa-lte.htm (accessed January 12, 2025).
- [32] Rainbow J. Spaceflight's chemically powered space tug heads for launch. 2022. *SpaceNews*. Available at: <https://spacenews.com/spaceflights-chemically-powered-space-tug-heads-for-launch/> (accessed January 12, 2025).
- [33] *Firefly Aerospace Announces Strategic Acquisition of Spaceflight Inc. to Bolster On-Orbit Services*. Available at: <https://fireflyspace.com/news/firefly-aerospace-announces-strategic-acquisition-of-spaceflight-inc-to-bolster-on-orbit-services/> (accessed January 12, 2025).
- [34] Investor presentation. 2020. *Momentum*. Available at: https://momentus.space/wp-content/uploads/2020/12/Momentum_Featured-Investor-Presentation_December-2020.pdf (accessed January 12, 2025).
- [35] Brandenburg J.E., Kline J., Sullivan, D. The microwave electro-thermal (MET) thruster using water vapor propellant. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, no. 33 (2), pp. 776–782. <https://doi.org/10.1109/tps.2005.845252>
- [36] Hummelt J., Podolsky V., Gascon N. *Pierced waveguide thruster*. Patent US11585331B2. 2021.
- [37] Hummelt J., Sercel J., Mainwaring P., Small J., Parman M. *Spacecraft propulsion devices and systems with microwave excitation*. Patent US11527387B2. 2021.
- [38] STI solar arrays with multi-hinge deployment mechanism ready to fly. 2020. *STI*. Available at: <https://spacetechnology.com/news/news-details/sti-solar-arrays-with-multi-hinge-deployment-mechanism-ready-to-fly> (accessed January 12, 2025).
- [39] Todd D. *Seven satellites trapped on Vigoride-3 (VR-3) after power fault*. 2022. Available at: <https://www.seradata.com/vigoride-3-vr-3-satellite-delivery-spacecraft-has-power-fault-that-meant-only-two-of-its-nine-sat-passengers-got-out/> (accessed January 12, 2025).
- [40] *Launches and Orbital Operations. 2022 — Launches to Orbit and Beyond*. Available at: <https://orbitalfocus.uk/Diaries/Launches/Launches.php?year=2022> (accessed January 12, 2025).
- [41] Foust J. Momentum tug raises orbit with water-fueled thruster. 2023. *SpaceNews*. Available at: <https://spacenews.com/momentum-tug-raises-orbit-with-water-fueled-thruster/> (accessed January 12, 2025).
- [42] Wilson L., Celano L., Arustamov G., Park J., Wong D. *Rollable tape spring solar array*. Patent US11936335B2. 2021.
- [43] Momentum Launches Vigoride-6 Orbital Service Vehicle on SpaceX Transporter-7 Mission. *Momentum*. Available at: <https://investors.momentum.space/news-releases/news-release-details/momentum-launches-vigoride-6-orbital-service-vehicle-spacex/> (accessed January 12, 2025).

- [44] NORAD. Apogee. Perigee. Eccentricity. 56196/Vigoride-6. *CelesTrak*. Available at: www.celestrak.org/NORAD/elements/graph-altitude.php?CATNR=56196 (accessed January 12, 2025).
- [45] Kompaniya Momentus ne smozhet vypolnit sleduyushchuyu missiyu iz-za nekhvatki sredstv [Momentus fails to complete the next mission due to the lack of funds]. *Kosmicheskaya Lenta*. Available at: <https://kosmolenta.com/index.php/2153-2023-01-17-mementus-mori> (accessed January 12, 2025).
- [46] *Launcher*. Available at: <https://www.launcherspace.com/> (accessed January 12, 2025).
- [47] Orbiter (*web archive*). Available at: <https://web.archive.org/web/20230613215501/https://www.launcherspace.com/orbiter> (accessed January 12, 2025).
- [48] Case study. Improving Critical Rocket Engine Performance with Advanced Metal AM. *Velo 3D*. Available at: https://velo3d.com/wp-content/uploads/2022/05/Improving-Critical-Rocket-Engine-Performance-Launcher-Case-Study.pdf?_t=1723047874 (accessed January 12, 2025).
- [49] Orbitalnyi transportnyj korabl Orbiter SN1 vyshel iz stroya [The Orbiter SN1 orbital transport ship is out of order]. *Dzen*. Available at: https://dzen.ru/a/Y_Sw6Nw2ykiZvzH- (accessed January 12, 2025).
- [50] *Vast space*. Available at: <https://www.vastspace.com/> (accessed January 12, 2025).
- [51] *Starfish space*. Available at: <https://www.starfishspace.com/> (accessed January 12, 2025).
- [52] Foust J. Second Orbiter transfer vehicle malfunctions. 2023. *SpaceNews*. Available at: <https://spacenews.com/second-orbiter-transfer-vehicle-malfunctions/> (accessed January 12, 2025).
- [53] An OTV for every mission. *Epic aerospace*. Available at: <https://epic-aerospace.com/spacecraft> (accessed January 12, 2025).
- [54] Impulse space qualifies the Saiph thruster ahead of first flight. *Impulse space*. Available at: <https://www.impulsespace.com/updates/impulse-space-qualifies-the-saiph-thruster-ahead-of-first-flight> (accessed January 12, 2025).
- [55] LEO Express-1 Mission Updates. *Impulse space*. Available at: <https://www.impulsespace.com/updates/leo-express-1> (accessed January 12, 2025).
- [56] LEO Express-2 Mission Updates. *Impulse space*. Available at: <https://www.impulsespace.com/updates/leo-express-2-mission-updates> (accessed January 19, 2025).
- [57] End-to-end space mobility. *Exotrail*. Available at: <https://www.exotrail.com> (accessed January 12, 2025).
- [58] Microsatellite Bus MP42. *Nanoavionics*. Available at: <https://nanoavionics.com/small-satellite-buses/microsatellite-bus-mp42/> (accessed January 12, 2025).
- [59] Weltman A. Exotrail completes first in-orbit delivery with SpaceVan orbital transfer vehicle. 2024. *Satellitetoday*. Available at: <https://www.satellitetoday.com/launch/2024/03/11/exotrail-completes-first-in-orbit-delivery-with-spacevan-orbital-transfer-vehicle/> (accessed January 12, 2025).
- [60] NORAD. Orbit Data. 58295/SpaceVan-001. *CelesTrak* Available at: <https://celestrak.org/NORAD/elements/graph-orbit-data.php?CATNR=58295> (accessed January 12, 2025).
- [61] Roadside Assistance in Space: The Launch of Optimus and Boreas X90. *Advanced Navigation*. Available at: <https://www.advancednavigation.com/case-studies/roadside-assistance-in-space-the-launch-of-optimus-and-boreas-x90/> (accessed January 12, 2025).

- [62] Australia's largest private satellite reaches orbit. *Space.gov*. Available at: <https://www.space.gov.au/news-and-media/australias-largest-private-satellite-reaches-orbit> (accessed 12.01.2025).
- [63] VS-1. 20N bipropellant thruster. *Valiant space*. Available at: <https://www.valiant.space.com/vs1> (accessed January 12, 2025).
- [64] *NASA spaceflight forum*. Available at: <https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=58042.240> (accessed January 12, 2025).
- [65] Atomos 2023 in Review. *Atomos*. Available at: <https://www.atomospace.com/blogs/atomos-2023-in-review> (accessed January 12, 2025).
- [66] Resistojet Propulsion Systems. *Electric propulsion laboratory*. Available at: <https://electricpropulsionlab.com/resistojet-propulsion-systems/> (accessed January 12, 2025).
- [67] Atomos space. Mission 1. *Atomos*. Available at: <https://www.atomospace.com/blogs/mission-1> (accessed January 12, 2025).
- [68] Orbital Express Space Operations Architecture. *Web archive*. Available at: <https://web.archive.org/web/20070313165744/http://www.darpa.mil/tto/programs/oe.htm> (accessed January 12, 2025).
- [69] Mission updates. *Atomos*. Available at: <https://www.atomospace.com/blogs/updates> (accessed January 17, 2025).
- [70] Space logistics and orbital transportation services. *D-Orbit*. Available at: <https://www.dorbit.space> (accessed January 17, 2025).
- [71] Deorbit Systems. State-of-the-Art of Small Spacecraft Technology. *NASA*. Available at: <https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems/> (accessed January 17, 2025).
- [72] ION hosted payload services. *D-Orbit*. Available at: <https://www.dorbit.space/media/1/12.pdf> (accessed January 17, 2025).
- [73] *B20 thruster*. *Dawn Aerospace*. 2024. Available at: <https://static1.squarespace.com/static/5e82736a5e6bb91e8af13ea7/t/65f2f1bb1022ad42c5a1b9c7/1710420438495/DA05.02+B20+Thruster+Brochure+20240301.pdf> (accessed January 17, 2025).
- [74] Missions. *D-orbit*. Available at: <https://www.dorbit.space/mission-updates> (accessed January 17, 2025).
- [75] ION Satellite Carrier. *Missions*. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/ION_Satellite_Carrier (accessed January 17, 2025).
- [76] Endless sky mission booklet. *D-Orbit*. Available at: <file:///C:/Users/Egor/Downloads/Endless%20Sky%20Mission%20Bookletpdf.pdf> (accessed January 19, 2025)
- [77] Ascend mission booklet. *D-Orbit*. Available at: <file:///C:/Users/Egor/Downloads/Ascend%20Mission%20Bookletpdf.pdf> (accessed January 19, 2025).
- [78] *The PocketQube Standard*. Issue 1. 2018. Available at: <https://static1.squarespace.com/static/53d7dcdce4b07a1cdbbc08a4/t/5b34c395352f5303fcec6f45/1530184648111/PocketQube+Standard+issue+1+-+Published.pdf> (accessed January 17, 2025).
- [79] ION SCV-011. *ISS Tracker*. Available at: <https://isstracker.pl/en/satelite/56957> (accessed January 17, 2025).

Shcheglov G.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: aerospace systems dynamics. e-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru

Teterina M.V., 5th Year Student, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: mariya10341@yandex.ru