

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАЗЕМНОГО СЕКМЕНТА СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

М. А. Дремухин✉, **В. Н. Наговицин**

*АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»,
г. Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация*

Создание ракетно-космического производства привело к мощному развитию промышленного потенциала региона и отдельных его городов. Поэтому развитие данного направления является актуальной задачей. В статье предлагается создать дополнительное направление по разработке и изготовлению крупногабаритных рефлекторов антенн для наземных антенных станций. В качестве материала при изготовлении сегментов и составных частей рефлектора предлагается использовать композиционные материалы, а формирование изделий предлагается вести относительно недорогим методом по принципу вакуумной инфузии. Данное направление способствует созданию устойчивого развития предприятия, включая систему образования, фундаментальную и прикладную научную отрасль, а также поддержанию конкурентоспособности изготавливаемой продукции, что значительно расширит присутствие предприятия на мировом рынке. Таким образом, работа в данном направлении – весьма перспективная сфера деятельности, которая поспособствует инновационному развитию предприятия, преобразованию структуры производства с учетом рыночных отношений, а также позволит внести значительный вклад в экономику региона.

Ключевые слова: космическая технология, спутниковая антенна, рефлектор, полимерный композиционный материал, развитие предприятия.

Введение

Ключевую роль в развитии оборонной промышленности и экономики Российской Федерации играют предприятия ракетно-космической промышленности, обеспечивая безопасность нашей страны и повышение качества жизни ее граждан. Стратегия развития предприятия предполагает постоянный поиск путей совершенствования его деятельности по всем направлениям – расширение объемов производства и развитие новых направлений, повышение его эффективности, внедрение новых технологий, разработка и освоение новой конкурентоспособной продукции, а также выход на новые рынки сбыта.

В последние годы межспутниковая связь является быстро развивающимся направлением науки и техники. Ее задачей является обеспечение сообщения между космическими аппаратами (КА) и земными станциями (ЗС), не находящими-

ся в прямой видимости [1]. Несмотря на внедрение оптоволоконных линий, спутниковые системы связи (ССС) продолжают играть важную роль в качестве существенного дополнения к ЗС связи на основе волоконно-оптических линий, что повышает эффективность функционирования СССР в целом, особенно в труднодоступных районах планеты.

Большинство действующих СССР на геостационарной орбите (ГСО) работает в диапазонах частот С (4/6 ГГц), Ku (11/14 ГГц), Ka (27/18 ГГц). В ближайшие годы следует ожидать появления искусственных спутников земли (ИСЗ), работающих в диапазонах 40/50 ГГц и выше [2].

Размещение спутниковых ретрансляторов на ГСО на высоте примерно 36000 километров над земной поверхностью приводит к ослаблению радиоволны при ее распространении на величину около 200 дБ, что соответствует 10^{-20} по мощности. Уровень такого слабого радиосигнала сравним с уровнем теплового излучения окружающих антенну ЗС атмосферы, почвы и расположенных рядом с ней предметов. Это излучение происходит в том

✉ d-max_70@mail.ru

же диапазоне частот, что и излучение радиосигнала, несущего информацию. Поэтому необходимо увеличивать мощность и пропускную способность ЗС, увеличивая точность отражающей поверхности и сам диаметр рефлектора приемной антенны.

1. Описание наземной антенной станции

Базовым и наиболее наукоемким направлением в ракетно-космической промышленности является проектирование, производство и обеспечение надежного функционирования КА на орбите. Предприятия, занимающиеся такой деятельностью, имеют развитую научно-производственную структуру и выполняют весь комплекс работ от проведения прикладных исследований, до сопровождения КА в космическом пространстве [3].

Реализация высоких эксплуатационных характеристик антенн является основной задачей конкурентоспособного производства КА [4]. Для связи, сопровождения и управления КА разрабатывается наземный антенный комплекс управления, который в упрощенном виде состоит из антенны, в состав которой входит: рефлектор, облучатель, контр-рефлектор. Рефлектор антенны является наиболее сложным элементом комплекса, от качества выполнения которого напрямую зависит работа всей ЗС. В центре рефлектора расположен облучатель, а напротив облучателя на опорах крепится контр-рефлектор, который имеет форму гиперboloида вращения и устанавливаются так, чтобы один из его фокусов совмещался с фокусом рефлектора, а второй находился вблизи его вершины, где расположен облучатель антенны.

На рис. 1 представлена наиболее распространенная двухзеркальная конструкция антенны, спроектированная по системе Кассегрена, предназначенная для формирования направленного электромагнитного луча путем переотражения от рабочей поверхности.

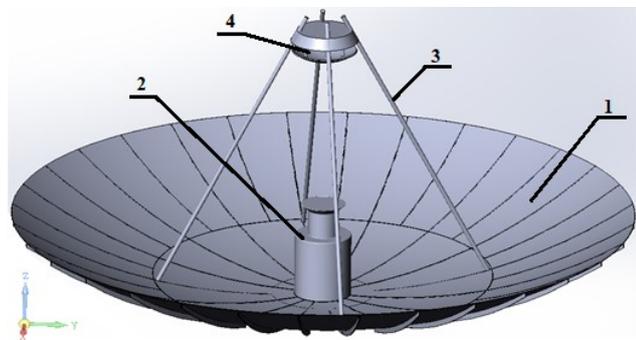


Рис. 1. Антенна ЗС: 1 – рефлектор; 2 – облучатель; 3 – опора; 4 – контр-рефлектор

Все антенны ЗС устанавливаются, как правило, на специальное приспособление, называемое опорно-поворотным устройством (ОПУ). Это

устройство, на котором закрепляется рефлектор антенны, служит для управления направлением максимального излучения в режиме передачи и приема телеметрии.

Антенны диаметром апертуры свыше 10 метров имеют большую массу, а воздействие ветровой нагрузки на рефлектор оказывает давление на ОПУ и самого ОПУ на фундамент. Это приводит, в зависимости от ветровой нагрузки и требований по точности наведения, к увеличению требований по прочности и ограничению к применяемым материалам и, как следствие, удорожанию всей конструкции [5].

Для того чтобы получить лидирующие позиции в области изготовления наземного сегмента необходимо ориентироваться на современные технологии. За основу брать новые технологии, результаты научных исследований и разработок в области науки и техники, действующие в настоящее время в развитых странах.

В компании АО «ИСС» впервые был разработан крупногабаритный прецизионный размеростабильный рефлектор для наземных антенных систем диаметром 11 метров, состоящий полностью из полимерных композиционных материалов (ПКМ, рис. 2), предназначенный для работы в Q/Ка-частотных диапазонах [6].

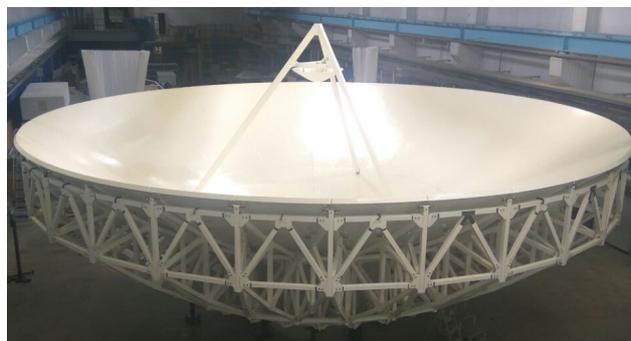


Рис. 2. Крупногабаритный рефлектор диаметром 11 метров

В состав интегрированной структуры АО «ИСС» входит дочернее предприятие АО «НПО ПМ-Развитие», которое разрабатывает и производит широкий спектр приемо-передающих антенн из алюминия диаметром от 0,3 до 9,3 метра, работающих в L, S, C, X, Ku, Ka-диапазонах для ЗС спутниковой связи [7]. Чтобы не создавать конкуренцию дочернему предприятию предлагается вести разработку и изготовление антенн для ЗС диаметром от 10 метров и выше самостоятельно, либо совместно с АО «НПО ПМ-Развитие».

Точность наведения крупногабаритных рефлекторов антенны для обеспечения надежной связи с КА зависит от устойчивости к температурным воздействиям, повышенной жесткости и высокой геометрической стабильности рефлектора. Для обеспечения этих факторов сегодня все больше ис-

пользуются ПКМ, основным из которых является углепластик [8]. Этот материал способен выдерживать необходимые для эксплуатации ЗС условия окружающей среды (от -50°C до $+40^{\circ}\text{C}$), имеет высокую жесткость и прочность при малой плотности с низким коэффициентом теплового расширения [9].

Также необходимо отметить экономическую эффективность применения композиционных материалов, как альтернативного источника для замены металлов, применяемых в космических конструкциях, что вызвано сравнительно малыми удельными затратами на производство композитных конструкций. Энергетические затраты на изготовление изделий из различных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Затраты электроэнергии на производство изделий

| Материал | Удельные затраты электроэнергии, кВт·ч/кг | |
|------------------------|---|-------------|
| | для материала | для изделия |
| Эпоксидный углепластик | 33,0 | 72,7 |
| Сталь | 35,2 | 220,4 |
| Алюминий | 48,5 | 392,4 |
| Титан | 189,5 | 1543,2 |

Для проведения оценки и подтверждения эксплуатационных требований крупногабаритных рефлекторов ЗС из композиционных материалов предлагается решение сопряженных задач меха-

ники деформируемого твердого тела, аэродинамики, теплопроводности и т. д.

2. Оборудование для изготовления рефлектора антенны

Производственная база АО «ИСС» позволяет изготовить как технологическую оснастку, так и сам рефлектор, провести механические испытания, обеспечивающие комплексную отработку, и проверку конструкций на транспортировочные, статические и динамические нагрузки. Наличие уникального станочного оборудования для измерения радиотехнических характеристик антенн обеспечит возможность изготовить и контролировать с высокой точностью детали рефлекторов и облучающих систем, которые определяют выходные характеристики антенн. Основная часть оборудования, необходимая для изготовления рефлектора ЗС, приведена в табл. 2.

В качестве примера на рис. 3 изображена наиболее часто применяемая в современных ЗС конструкция 3D модели рефлектора диаметром 21 метр (без усиливающего каркаса), имеющая форму параболоида с двойной поверхностью. Предполагается, что «начинка» будет выполнена в виде трехслойной оболочки с несущими обшивками из углепластика и алюминиевым сотовым наполнителем. Жесткость такого рефлектора определяется высотой наполнителя и модулем упругости материала несущих слоев.

Таблица 2

Оборудование, находящееся на предприятии

| Наименование | Размер рабочей зоны (Д×Ш×В), мм |
|---|---------------------------------|
| Оборудование для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов | |
| Горизонтальная пропиточная машина PLS-250-2F | 1800×3200 |
| MAW 20 FB 5/1 Пятикоординатный намоточный станок | 6500×600 |
| MAW 20 MS 4/3 Четырехкоординатный трехшпиндельный станок | 3000×300 |
| MAW 20 LS 6/1 Шестикоординатный намоточный станок | 1500×400 |
| Оборудование для раскроя композиционного материала | |
| OPAL WATERJET Установка гидроабразивной резки, фирма «ECKERT» | 6000×2000×250 |
| PTV WJ2060B 1Z-D-PJ Установка гидроабразивной резки | |
| EuroLaser LCS L-3200 Плоттер для лазерного раскроя | 3200×1800 |
| Оборудование для обработки металлических изделий | |
| MATRIX1300 Портально-фрезерный станок | 3500×3000×1300 |
| Soraluce FX-10.000 Горизонтально-расточной обрабатывающий центр | 10000×1900×5300 |
| Оборудование для контроля геометрических поверхностей | |
| G90CS45.20.12 Контрольно-измерительная машина | 6200×2940×750 |
| Контрольно-измерительная машина LK V GP 60-40-25 | 6000×3000×750 |
| Лазерный сканер (радар) MV 224, 260, 350 | 10000×10000 |

| | |
|--|-------------------|
| Оборудование для контроля параметров антенн | |
| Сверхширокополосный горизонтальный сканер | 10000×10000×18000 |
| Оборудование для проведения физико-механических испытаний образцов | |
| Испытательная машина Instron 5582 | |
| Оборудование для транспортирования изделий | |
| Самоходная тележка KUKA | |

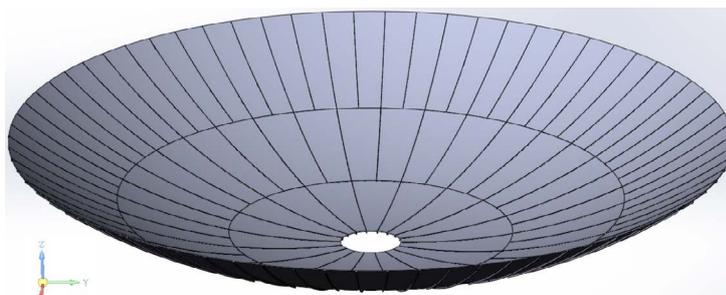


Рис. 3. 3D модель рефлектора диаметром 21 метр

Данная модель рефлектора состоит из 126 сегментов, разделенных на три ряда колец. В каждом кольце сегмент имеет между собой одинаковую конструкцию.

3. Описание метода изготовления рефлектора

Для изготовления сегментов рефлектора наиболее рациональным по стоимости будет являться метод вакуумной инфузии. Данный метод заключается в пропитке связующим сухого армирующего наполнителя, состоящего из выложенных слоев ткани или преформ строго определенным образом на поверхность формообразующей оснастки. После

чего создают вакуумное давление в полости между оснасткой и вакуумным мешком с последующей полимеризацией при комнатной температуре [10]. Такая технология относительно проста и позволяет получить практически готовое изделие после формования за один цикл [11]. Типовая схема многослойного пакета рефлектора показана на рис. 4.

Для повышения весовой эффективности конструкции рефлектора выбирается требуемое количество слоев, обусловленное диаметрными габаритными размерами и необходимой жесткостью конструкции. Исходя из толщины оболочки, количество слоев характеризуется погонной плотностью и определяется как отношение массы рефлектора к площади апертуры.

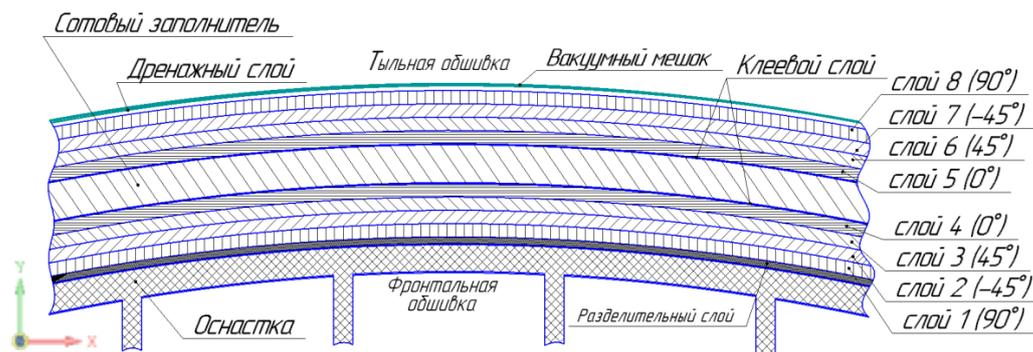


Рис. 4. Схема многослойного пакета рефлектора

Технологическая оснастка для изготовления сегментов может быть выполнена, например, на предприятии АО «ИСС», причем технология вакуумной инфузии и полимеризация при комнатной температуре позволяет в качестве материала для оснастки использовать алюминий. Такая оснастка не ограничена сроком хранения и по-

зволяет выполнять неограниченное количество съёмов с ее рабочей поверхности при соблюдении технологического процесса [12]. Таким образом, для изготовления рефлектора диаметром 21 метр достаточно будет изготовить три типа оснастки, по одному для каждого ряда колец, состоящего из сегментов.

4. Результаты обмера

На рис. 5 в качестве примера показано графическое представление результатов измерения цельного рефлектора диаметром до 2,5 метра, изготовленного из алюминия с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) по 3804 точкам.

Для сравнения на рис. 6 показано графическое представление результатов измерения цельного рефлектора диаметром до 2,5 метра, изготовленного из углепластика с помощью КИМ по 4008 точкам.

По результатам обмера видно, что среднеквадратическое отклонение (СКО) рефлектора, изготовленного из углепластика, значительно превосходит аналогичный рефлектор из алюминия, тем самым подтверждая перспективу применения ПКМ при изготовлении рефлекторов.

На предприятии уже существуют технологии, которые могут стать источниками качественного экономического роста и долговременного удержания лидирующих позиций на рынке.

Для освоения дальнего космоса (под дальним космосом понимается расстояние от Земли в 1,5 миллиона километров в точке Лагранжа L_2) с помощью ССС, установленных на Земле, уже необходима апертура антенны свыше 60 метров [13]. Данный метод по принципу вакуумной инфузии обеспечит прочность и жесткость изготовления сегментов рефлектора и сбор самой антенны с апертурой 60 метров и выше, сохраняя при этом высокую геометрическую стабильность.

Для производства рефлекторов ЗС можно построить отдельный корпус или реконструировать и переоснастить уже имеющийся производственный корпус на территории предприятия.

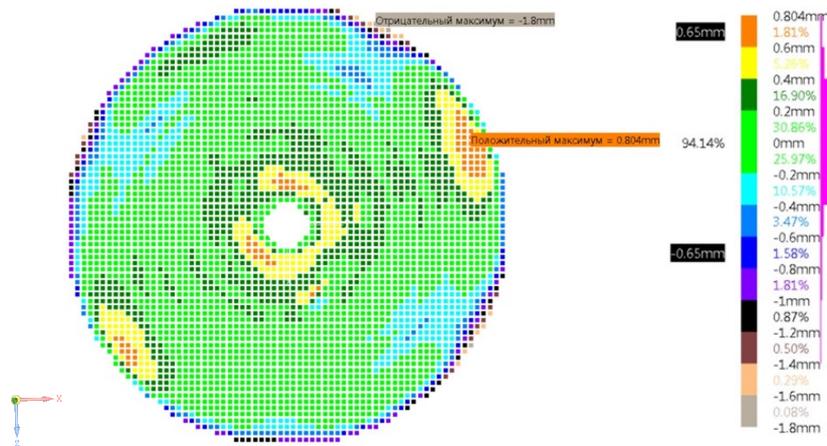


Рис. 5. Результат обмера рабочей поверхности рефлектора из алюминия диаметром до 2,5 метра

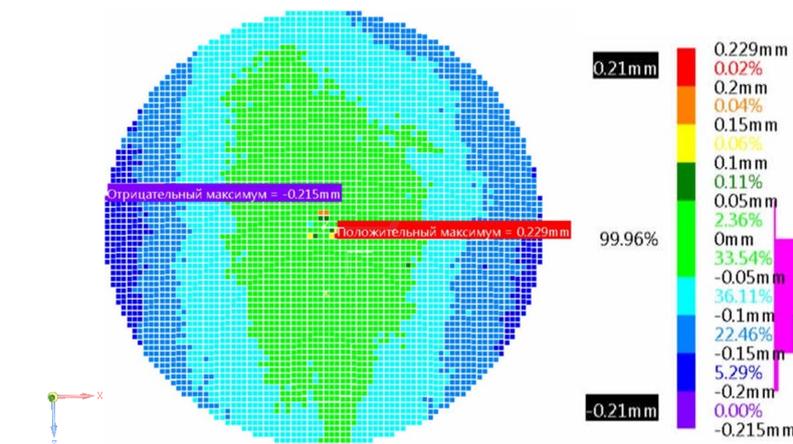


Рис. 6. Результат обмера рабочей поверхности рефлектора из углепластика диаметром до 2,5 метра

Заключение

Создание нового направления развития предприятия внесет свой вклад в развитие региона и отдельных его городов, создаст дополнительные рабочие места, поспособствует коммерциализации

космической деятельности, а также увеличению своей доли на рынках космических услуг за счет производства конкурентоспособной продукции, а именно крупногабаритных рефлекторов земных станций, изготовленных из полимерных композиционных материалов.

Список литературы

- [1] Тестоедов Н. А. Технология производства космических аппаратов : учебник. Красноярск : СибГАУ, 2009. 352 с.
- [2] Сомов А. М., Кабетов Р. В. Проектирование антенно-фидерных устройств : учеб. пособие для вузов. М. : Горячая линия – Телеком, 2016. 500 с.
- [3] Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т., 2011. 488 с.
- [4] Кочержский Г. Н. Антенно-фидерные устройства : учебник для вузов. М. : Радио и связь, 1981. 280 с.
- [5] Поляк В. С., Бервалдс Э. Я. Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов : учеб.-метод. пособие. Рига : Зинатне, 1990. 526 с.
- [6] Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ict.nsc.ru/ru/infores/uchenye-ivt-rabotayut-obespechenie-nadezhnoy-kosmicheskoy-svyazi/> (дата обращения: 17.07.2021).
- [7] Антенны земных станций спутниковой связи [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npopmrazvitie.ru/produksiya/antenni-zemnich-stantsiy-sputnikovoy-svyazi-i-televideniya/> (дата обращения: 17.07.2021).
- [8] Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С., Горбаткина Ю. А., Крыжановский В. К., Куперман А. М., Симонов-Емельянов И. Д., Халиулин В. И., Бунаков В. А. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. Санкт-Петербург : Профессия, 2008. 560 с.
- [9] Резник С. В., Просунцов П. В., Азаров А. В. Обоснование конструктивно-компоновочной схемы рефлектора зеркальной космической антенны с высокой стабильностью формы и малой погонной плотностью // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88. № 3. С. 674.
- [10] Николаев А. Ф., Крыжановский В. К., Бурлов В. В., Шульгина Э. С., Лавров Н. А., Дворко И. М., Сивцов Е. В., Крыжановская Ю. В., Семенова А. Д. Технология полимерных материалов : учеб. пособие. Санкт-Петербург : Профессия, 2008. 544 с.
- [11] Чичурин В. Е., Наговицин А. В., Патраев Е. В., Данилов В. Е., Михнев М. М. Способ изготовления рефлектора. Пат. № 2563198 Российская Федерация, 2015. Бюл. № 26.
- [12] Дремухин М. А., Наговицин В. Н. Способ изготовления элементов рефлектора из полимерных композиционных материалов // Решетневские чтения : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. 2020. Т. 1. С. 431–433.
- [13] Коротеев А. С. Пилотируемая экспедиция на Марс. М. : Российская академия космонавтики им. К. Э. Циолковского, 2006. 320 с.

STRATEGIC PLANNING OF THE COMPANY'S DEVELOPMENT PATH THROUGH THE DEVELOPMENT AND MANUFACTURE OF A GROUND SEGMENT OF SATELLITE COMMUNICATIONS

M. A. Dremukhin, V. N. Nagovitsin

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, Russian Federation*

The creation of rocket and space production led to the powerful development of the industrial potential of the region and its individual cities. Therefore, the development of this direction is an urgent task. The article proposes to create an additional direction for the development and manufacture of large-sized antenna reflectors for ground antenna stations. As a material in the manufacture of segments and components of the reflector, use composite materials and the formation of products is carried out by a relatively inexpensive method according to the principle of vacuum infusion. This direction contributes to the creation of sustainable development of the enterprise, including the education system, the fundamental and applied scientific industry, as well as maintaining the competitiveness of manufactured products, which will significantly expand the presence of the enterprise in the world market. Thus, work in this direction is a very promising area of activity, which will contribute to the innovative development of the enterprise,

the transformation of the structure of production, taking into account market relations and will also make a significant contribution to the economy of the region.

Keywords: space technology, satellite dish, reflector, polymer composite material, enterprise development.

References

- [1] Testoyedov N. A. *Tekhnologiya proizvodstva kosmicheskikh apparatov* [Technology of production of spacecraft]. Krasnoyarsk, SibGAU, 2009, 352 p. (In Russian)
- [2] Somov A. M., Kabetov R. V. *Proektirovanie antenno-fidernyh ustrojstv* [Design of antenna-feeder devices]. Moscow, Hotline-Telecom, 2016, 500 p. (In Russian)
- [3] Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsionnogo obespecheniya* [Fundamentals of spacecraft design information support]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2011, 488 p. (In Russian)
- [4] Kocherzhsky G. N. *Antenno-fidernye ustrojstva* [Antenna-feeder devices]. Moscow, Radio and communication, 1981, 280 p. (In Russian)
- [5] Polyak V. S., Bervalds E. Ya. *Precizionnye konstrukcii zerkal'nykh radioteleskopov* [Precision designs of mirror radio telescopes]. Riga, Zinatne, 1990, 526 p. (In Russian)
- [6] *Federal'nyj issledovatel'skij centr informacionnyh i vychislitel'nyh tekhnologij* [Federal Research Center for Information and Computing Technologies]. Available at: <http://www.ict.nsc.ru/ru/infores/uchenye-ivt-rabotayut-obespechenie-nadezhnoy-kosmicheskoy-svyazi/> (accessed 17.07.2021). (In Russian)
- [7] *Antenny zemnykh stancij sputnikovoj svyazi* [Antennas of Earth stations of satellite communications]. Available at: <http://www.npopmrazvitie.ru/produktsiya/antenni-zemnich-stantsiy-sputnikovoy-svyazi-i-televideniya/> (accessed 17.07.2021). (In Russian)
- [8] Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S., Gorbatkina Yu. A., Kryzhanovsky V. K., Kuperman A. M., Simonov-Emerelyanov I. D., Khaliulin V. I., Bunakov V. A. *Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologii* [Polymer composite materials: structure, properties, technology]. St. Petersburg, Profession, 2008, 560 p. (In Russian)
- [9] Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Azarov A. V. *Obosnovanie konstruktivno-komponovochnoj skhemy reflektora zerkal'noj kosmicheskoy anteny s vysokoj stabil'nost'yu formy i maloj pogonnoj plotnost'yu* [Substantiation of the design-layout diagram of the reflector of a reflector space antenna with high shape stability and low linear density] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015, vol. 88, no. 3, P. 674. (In Russian)
- [10] Nikolaev A. F., Kryzhanovsky V. K., Bourlov V. V., Shulgina E. S., Lavrov N. A., Dvoroko I. M., Sivtsov E.V., Kryzhanovskaya Yu. V., Semenova A. D. *Tekhnologiya polimernyh materialov* [Technology of polymeric materials]. St. Petersburg, Profession, 2008, 544 p. (In Russian)
- [11] Chichurin V. E., Nagovitsin A. V., Patraev E. V., Danilov V. E., Miknev M. M. *Sposob izgotovleniya reflektora* [Method of manufacturing a reflector]. Patent RU 2563198, 2015, bulletin no. 26.
- [12] Dremukhin M. A., Nagovitsin V. N. *Sposob izgotovleniya elementov reflektora iz polimernyh kompozicionnykh materialov* [Method of manufacturing reflector elements from polymer composite materials] // Reshetnev readings : materials of the XXIV International scientific-practical conference, Krasnoyarsk, 2020, vol. 1, pp. 431–433. (In Russian)
- [13] Koroteev A. S. *Pilotiruemaya ekspeditsiya na Mars* [Manned expedition to Mars]. Moscow, Russian Academy of Cosmonautics named after K. E. Tsiolkovsky, 2006, 320 p. (In Russian)

Сведения об авторах

Дремухин Максим Андреевич – инженер АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Сибирский федеральный университет в 2021 году. Область научных интересов: разработка и проектирование крупногабаритных изделий.

Наговицин Василий Николаевич – кандидат технических наук, доцент межинститутской базовой кафедры «Прикладная физика и космические технологии» Сибирского федерального университета, главный специалист по прочности антенных систем АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва». Окончил Пермский ордена Трудового Красного Знамени государственный университет имени А. М. Горького в 1977 году. Область научных интересов: механика композиционных материалов.