

Keywords: Kendall's classification, requests flows, queues, correlation, loading, distributions

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.3.11

Likhttsinder Boris Yakovlevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; Professor of Networks and Communication Systems Department, Doctor of Technical Science. Tel. +7 846 333-47-69. E-mail: lixt@psuti.ru

References

1. Kendall D.G. Some Problems in the theory of queues. *Journal of Royal Statistical Society*, 1951, vol. 13, no. 2, pp. 151–173.
2. Tarasov V.N. Study of a system with shifted hyper-Erlang and exponential distributions. *Infokommunikacionnye tehnologii*, 2020, vol. 18, no. 1, pp. 27–31. DOI: <https://doi.org/10.18469/ikt.2020.18.1.04>. (In Russian.)
3. Likhttsinder B.Ya. Interval method for analyzing multiservice traffic of access networks. *Elektrosvyaz*, 2015, no. 12, pp. 52–54. (In Russian.)
4. Likhttsinder B.Ya. *Traffic of Multiservice Access Networks (Interval Analysis and Design)*. Moscow: Gorjachaja linija – Telekom, 2018, 290 p. (In Russian.)
5. Vishnevskij V.M., Dudin A.N. Queuing systems with correlated input flows and their application for modeling telecommunication networks. *Avtomatika i telemekhanika*, 2017, no. 8, pp. 3–59. (In Russian.)
6. *Fundamentals of Modeling Complex Systems*. Ed. by I.V. Kuzmin. Kiev: Vischa shkola, 1981, 360 p. (In Russian.)
7. Stepanov S.N. *Teletraffic Theory. Concepts, Models, Applications*. Moscow: Gorjachaja linija – Telekom, 2015, 808 p. (In Russian.)
8. Basharin G.P. *Lectures on the Mathematical Theory of Teletraffic*. Moscow: Izd. RUDN, 2009, 342 p. (In Russian.)
9. Klejnrok L. *Queuing Theory*. Eng. trans. ed. by V.I. Nejman. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 344 p. (In Russian.)
10. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. *Introduction to Queuing Theory*. Moscow: Kom-Kniga, 2005, 400 p. (In Russian.)

Received 30.07.2020

ТЕХНОЛОГИИ РАДИОСВЯЗИ, РАДИОВЕЩАНИЯ И ТЕЛЕВИДЕНИЯ

УДК 621.396.69

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ В КОНСТРУКЦИЯХ АНТЕННЫХ НАСАДОК

Мальцев А.С.

АО «ПКЦ «Прогресс», Самара, РФ

E-mail: malcev-tsskb@mail.ru

В статье представлены результаты моделирования в системе автоматизированного проектирования Ansys HFSS передающей антенной насадки S-диапазона, необходимой для проведения испытаний антенно-фидерных устройств совместно с радиотехническими системами ракет-носителей или космических аппаратов на техническом или стартовом комплексе космодрома, где используется мобильная башня обслуживания. При проектировании оптимальной конструкции антенной насадки, кроме определения размеров корпуса, оптимального расположения и геометрических характеристик элемента связи и настроечного элемента, большое значение имеет правильный выбор радиопоглощающего материала. В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований применения в конструкции антенной насадки S-диапазона отечественных радиопогло-

щающих материалов марки «ХВ». Показано, что оптимальным вариантом является применение в конструкции АН S-диапазона для бортовой антенны радиотехнической системы ракеты космического назначения радиопоглощающего материала ХВ-3.2, у которого максимальное поглощение мощности происходит в диапазоне более высоких частот, при этом антенная насадка обеспечивает согласованный режим работы с бортовой антенной, и величина ослабления мощности не превышает 5 дБ.

Ключевые слова: антенная насадка, ретрансляционное антенно-фидерное устройство, мобильная башня обслуживания стартового комплекса, коэффициент стоячей волны, ослабление мощности, радиогерметичность, радиопоглощающий материал

Введение

Применение мобильных башен обслуживания (МБО) для испытания ракеты космического назначения (РКН) на стартовых комплексах (СК) современных космодромов, таких как Гвианский космический центр (ГКЦ), во Французской Гвиане в Южной Америке и Восточный в Амурской области Российской Федерации, требует применения в схемах ретрансляционного антенно-фидерного устройства (РАФУ) антенных насадок (АН), позволяющих устранить влияние паразитных каналов связи и повысить качество принимаемой информации от радиотехнических систем (РТС) РКН на наземных измерительных пунктах [1; 2].

Антенные насадки (рисунок 1) устанавливаются непосредственно на антенны РТС РКН и применяются для экранирования излучения сигналов РТС и отвода части излучаемой мощности на наземную приемную регистрирующую станцию (НПРС) или через ретрансляционное антенно-фидерное устройство (РАФУ) для качественного контроля функционирования системы совместно с АФУ при испытаниях на стартовом комплексе [3; 4]. Где 1 – антенна АФУ РТС РН; 2 – металлический корпус АН; 3 – радиопоглощающий материал; 4 – элемент связи АН; 5 – настроечный элемент АН; 6 – ВЧ-соединитель АН. Антенные насадки характеризуются тремя основными электрическими параметрами: коэффициент стоячей волны (КСВ) АФУ РТС РН с установленными АН (не более 1,5); величина ослабления мощности в АН (не более 5 дБ); радиогерметичность АН (не менее 25 дБ).

Элемент связи в конструкции АН необходим для приема ВЧ-мощности от антенны АФУ РТС РН и передачи ее на наземную приемно-регистрающую станцию или в РАФУ. Настроечный элемент в конструкции АН необходим для изменения входного сопротивления антенны АФУ РТС РН с установленной насадкой (обеспечение согласованного режима работы антенной насадкой с бортовым АФУ РТС РН).

Расчет геометрических параметров конструкции и электрических характеристик антенных

насадок проводится с помощью известного, хорошо апробированного программного комплекса – САПР Ansys HFSS [5–7], использующего для решения трехмерных электродинамических задач метод конечных элементов (МКЭ) [8; 9]. МКЭ обладает большей универсальностью при анализе структур, содержащих сложные магнито-диэлектрические среды с потерями и анизотропией, примером которой является антенная насадка.

Постановка задачи

При проектировании АН, помимо определения оптимального расположения и геометрических характеристик элемента связи и настроечного элемента АН, большое значение имеет правильный выбор радиопоглощающего материала.

В качестве такого материала, поглощающего электромагнитную энергию, целесообразно использовать пластины эластичные отечественного производства «ХВ», такие как ХВ-2.0, ХВ-3.2, ХВ-10.6, поскольку они являются доступными и наиболее распространенными [10; 11]. Характеристики радиопоглощающих пластин эластичных «ХВ» представлены в таблице 1.

Анализ свойств радиопоглощающих материалов марки «ХВ»

Учитывая рабочую частоту бортовых передающих устройств РКН S-диапазона (2249 МГц), видится наиболее очевидным выбор в качестве

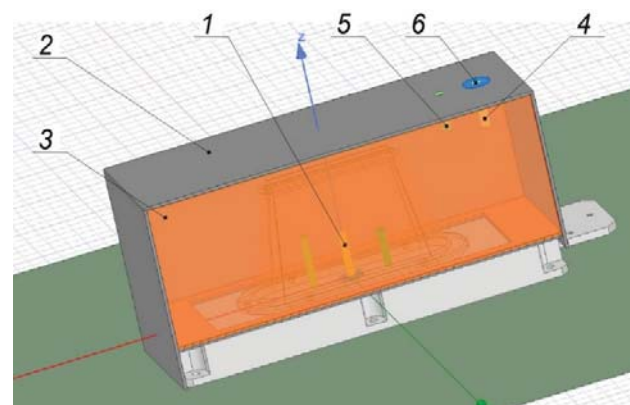


Рисунок 1. Антенная насадка, установленная на бортовую антенну АФУ РТС РКН

Таблица 1. Характеристики пластин эластичных «ХВ»

Наименование характеристики	Марка пластин		
	ХВ-2.0	ХВ-3.2	ХВ-10.6
Рабочий диапазон длин волн, см	1,8–2,2	2,9–3,75	9,5–12,5
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,005	0,015	0,07
Тангенс угла магнитных потерь	0,53	0,60	0,75
Магнитная проницаемость	1,3	1,36	3,4
Диэлектрическая проницаемость	12	14,8	20

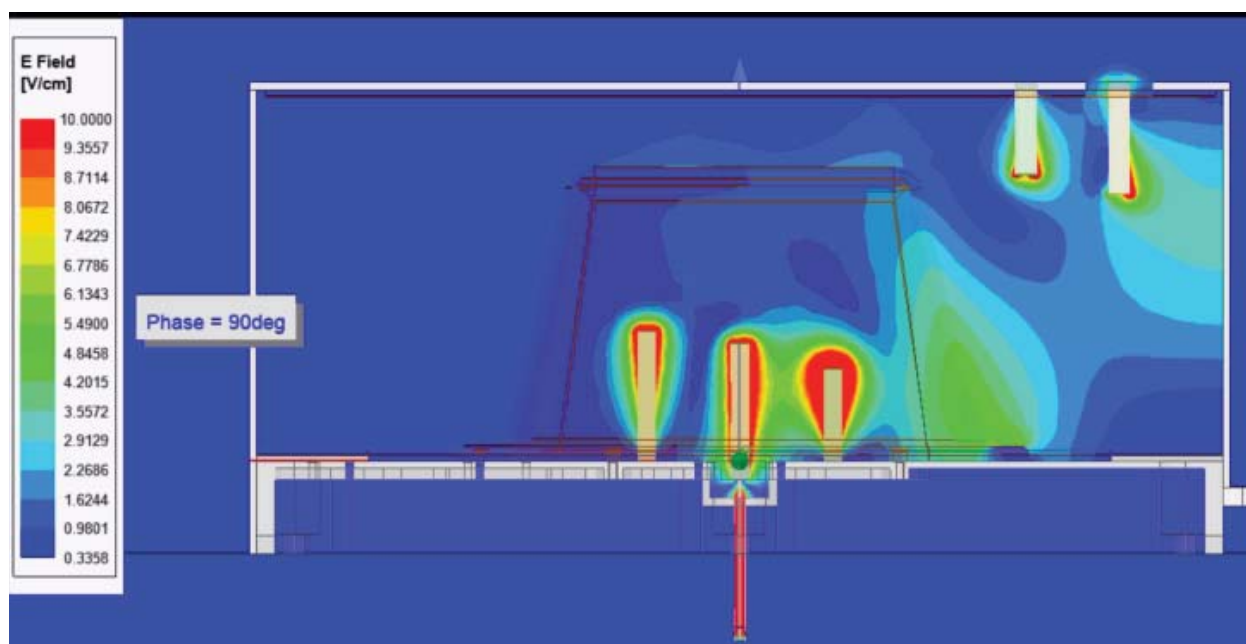


Рисунок 2. Распределение электрического поля внутри объема АН с радиопоглощающим материалом ХВ-10.6

радиопоглощающего материала пластины эластичные ХВ-10.6, поскольку его рабочий диапазон частот наиболее близок к рабочей частоте передающего устройства. Результат расчета электрического поля внутри объема антенной насадки представлен на рисунке 2. При применении в конструкции АН радиопоглощающего материала ХВ-10.6 максимальное значение напряженности электрического поля в области оптимального расположения элемента связи и настроечного элемента составляет 10 В/см, величина ослабления мощности в АН составляет 16,6 дБ. АН обеспечивает согласованный режим работы с антенной АФУ РТС РКН (КСВ = 1,12).

При применении радиопоглощающего материала ХВ-10.6 в конструкции АН S-диапазона частот возможно добиться согласованного режима работы с бортовым АФУ РТС. Однако его применение приводит к значительному росту величины ослабления мощности внутри объема АН, при этом величина ослабления мощности в

АН значительно превышает 5 дБ, что приводит к ухудшению мощностных характеристик РАФУ и ухудшению качества приема информации РТС РКН при испытаниях на стартовом комплексе.

Следовательно, необходимо применить радиопоглощающий материал, максимальное поглощение электромагнитного излучения у которого происходило бы в области более высоких частот по отношению к рабочей частоте бортового передатчика РТС РКН.

Так, например, при применении в конструкции АН радиопоглощающего материала ХВ-3.2 максимальное значение напряженности электрического поля в области оптимального расположения элемента связи и настроечного элемента составляет 15 В/см (рисунок 3), величина ослабления мощности в АН – 4,7 дБ. АН обеспечивает согласованный режим работы с антенной АФУ РТС РКН (КСВ = 1,10).

Справедливо предположить, что применение в конструкции АН радиопоглощающего материала-

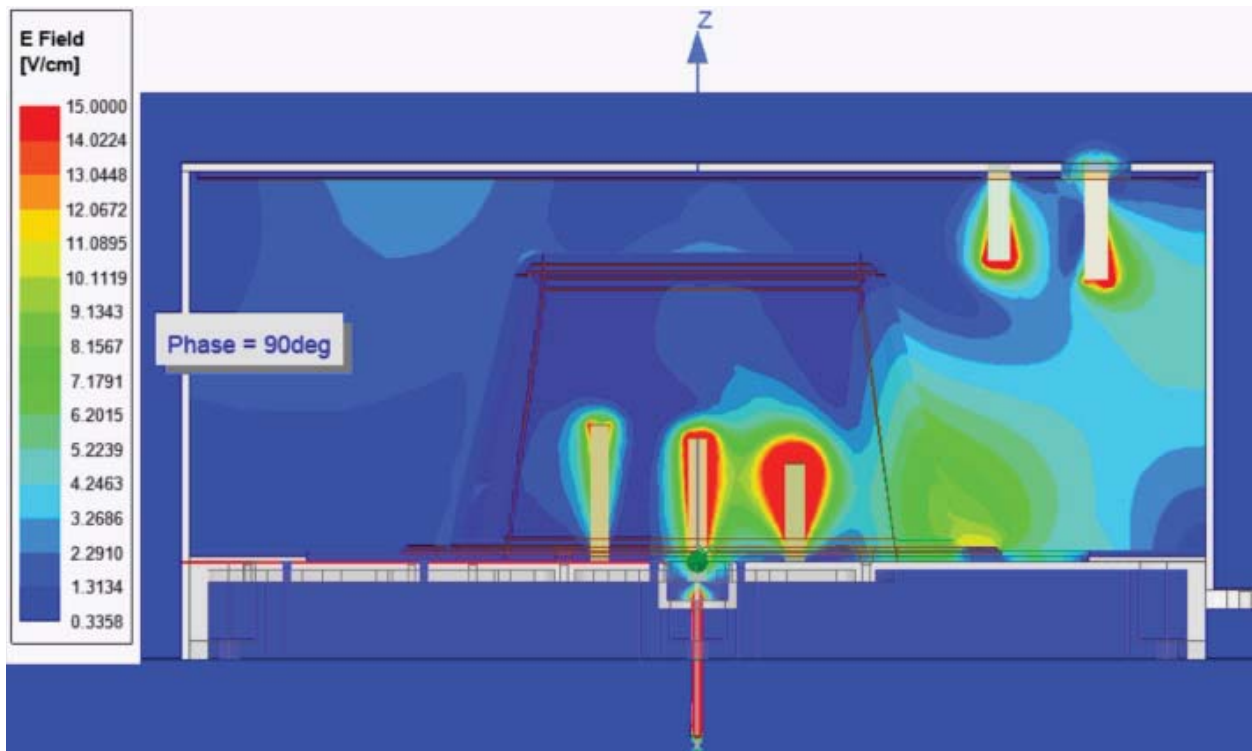


Рисунок 3. Распределение электрического поля внутри объема АН с радиопоглощающим материалом ХВ-10.6

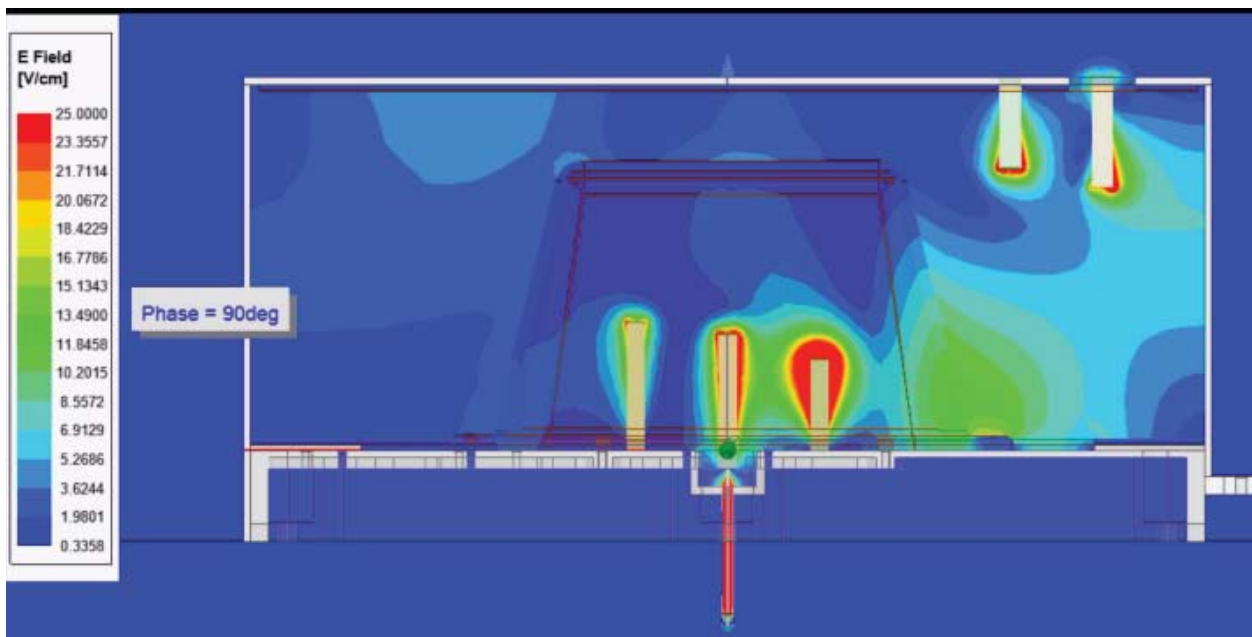


Рисунок 4. Распределение электрического поля внутри объема АН с радиопоглощающим материалом ХВ-10.6

ла ХВ-2.0 может привести к снижениям потерь в АН по причине еще большего отдаления рабочей частоты материала ХВ-2.0 от рабочей частоты передающего устройства РТС РКН.

Действительно, в антенной насадке с радиопоглощающим материалом ХВ-2.0 максимальное значение напряженности электрического поля в области оптимального расположения элемента связи и настроечного элемента увеличилось и составило 25 В/см (рисунок 4), величина осла-

бления мощности в АН снизилась до значения в 2,74 дБ, что положительным образом отразилось бы на мощностных характеристиках РАФУ относительно уровней мощности паразитных каналов связи и на качестве приема информации РТС РКН при испытаниях на стартовом комплексе.

Однако такая антенная насадка не обеспечивает согласованного режима работы с АФУ РТС РКН. Не представляется возможным определить оптимальное расположение и геометрические

Таблица 2. Результаты моделирования АН с радиопоглощающими материалами «ХВ»

Материал	Диапазон длин волн, см	Диапазон рабочих частот, МГц	КСВ бортовой антенны с установленной АН	Величина ослабления мощности в АН, дБ	Величина радиогерметичности, дБ
ХВ-2.0	1,8–2,2	13636–16483	5,38	2,74	32,3
ХВ-3.2	2,9–3,75	8000–10334	1,10	4,68	38,0
ХВ-10.6	9,5–12,5	2400–3158	1,12	16,6	42,4

Таблица 3. Анализ результатов моделирования и экспериментального исследования антенных насадок S-диапазона с различными радиопоглощающими материалами

РПМ	Характеристика	Модели АН	Экспериментального образца АН	Отклонение, %
ХВ-10.6	Ослабление мощности в АН, дБ	16,6	16,2	9,2
	КСВ	1,12	1,21	7,4
ХВ-3.2	Ослабление мощности в АН, дБ	4,68	4,12	12
	КСВ	1,10	1,23	10,5
ХВ-2.0	Ослабление мощности в АН, дБ	5,38	5,11	10,7
	КСВ	2,74	2,25	5

характеристики элемента связи и настроечного элемента. При проведении длительных испытаний РТС РКН совместно с АФУ на стартовом комплексе при нахождении РКН внутри закрытой зоны МБО будут получены повышенные значения отраженной мощности.

Результаты моделирования АН с различными радиопоглощающими материалами на рабочей частоте 2249 МГц представлены в таблице 2.

Экспериментальное исследование характеристик АН S-диапазона с радиопоглощающими материалами марки «ХВ»

Для проведения экспериментальных исследований, полученных в результате моделирования электрических характеристик, был разработан и изготовлен экспериментальный образец АН частот S-диапазона. Сравнительный анализ результатов теоретических расчетов и характеристик экспериментального образца для радиопоглощающих материалов ХВ-2.0, ХВ-3.2, ХВ-10.6 представлен на рисунках 5–7 и в таблице 3.

Проектирование антенных насадок с применением САПР Ansys HFSS обеспечивает высокую точность расчетов. Полученные при моделировании характеристики совпадают с физически измеренными характеристиками. Однако для получения достоверных результатов нужно выбрать

правильные параметры расчета. Это относится к корректному построению геометрической модели антенной насадки, точному заданию свойств материалов, к выбору машинных ресурсов, возможности которых определяют, насколько мелко можно разбить пространство на элементы декомпозиции. Результаты исследований АН с различными радиопоглощающими материалами показали достаточно хорошее совпадение электрических характеристик эксперимента с расчетными в HFSS методом конечных элементов.

Заключение

По результатам моделирования и экспериментальных исследований установлено, что оптимальным вариантом является применение в конструкции АН S-диапазона для бортовой антенны АФУ РТС РКН радиопоглощающего материала ХВ-3.2, у которого максимальное поглощение мощности происходит в диапазоне более высоких частот, при этом АН обеспечивает согласованный режим работы с бортовой антенной, и величина ослабления мощности не превышает 5 дБ.

Применение в АН радиопоглощающего материала ХВ-2.0 способствует передаче большей мощности в РАФУ, однако такая АН не обеспечивает согласованного режима работы с бортовой антенной, что может привести к значительному снижению ресурса или выходу из строя

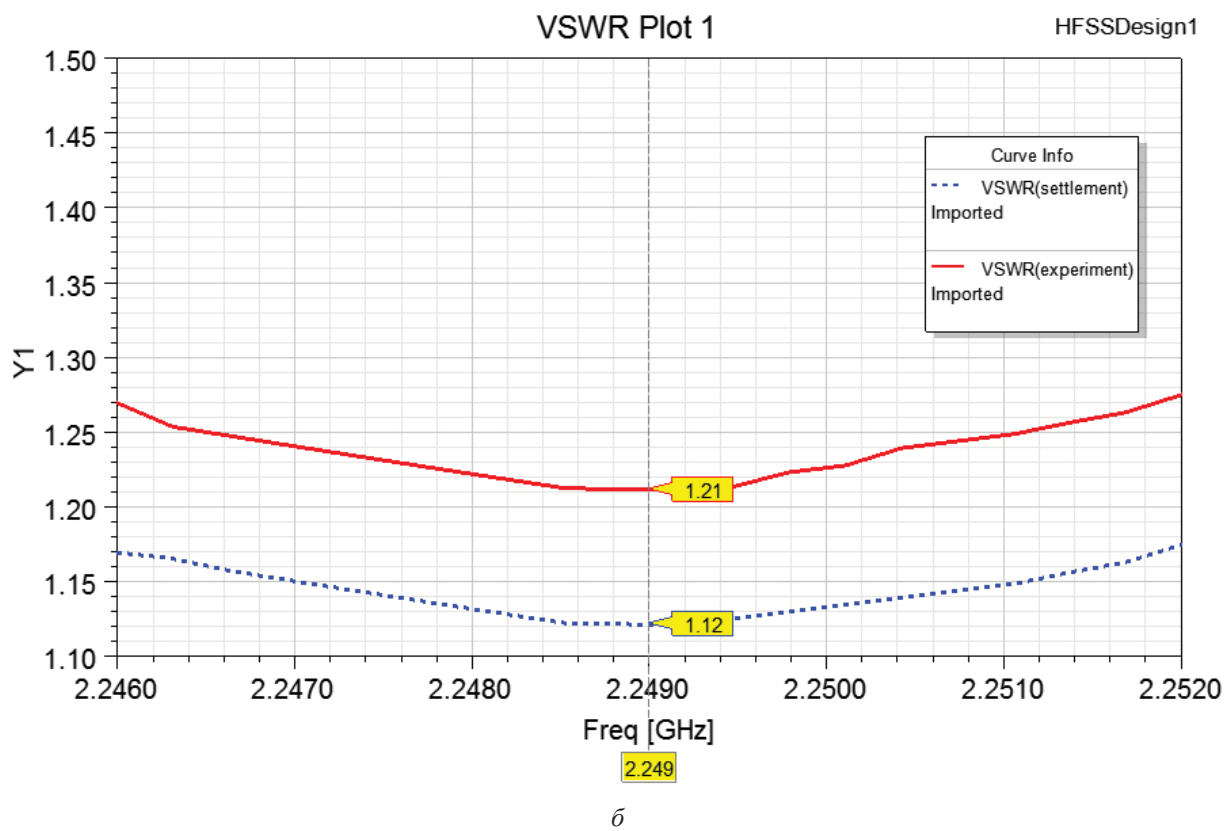
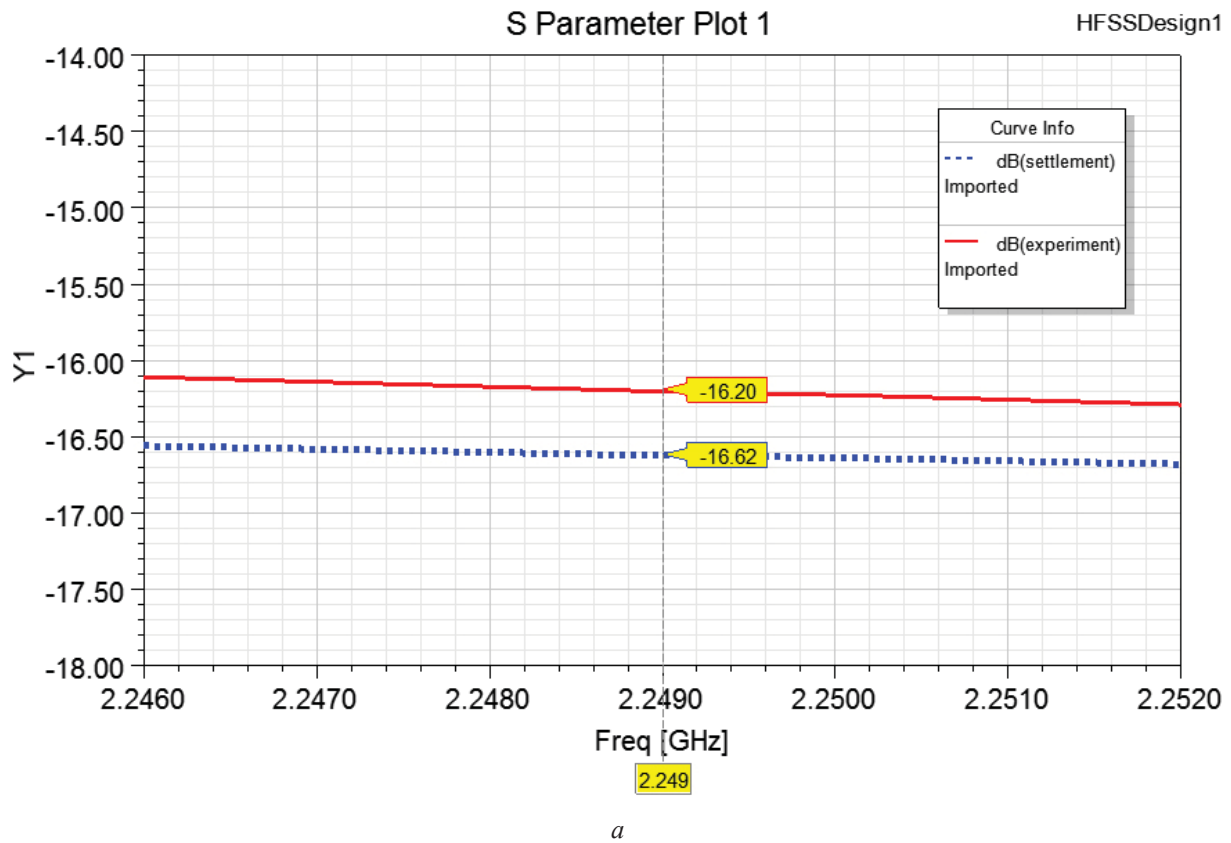
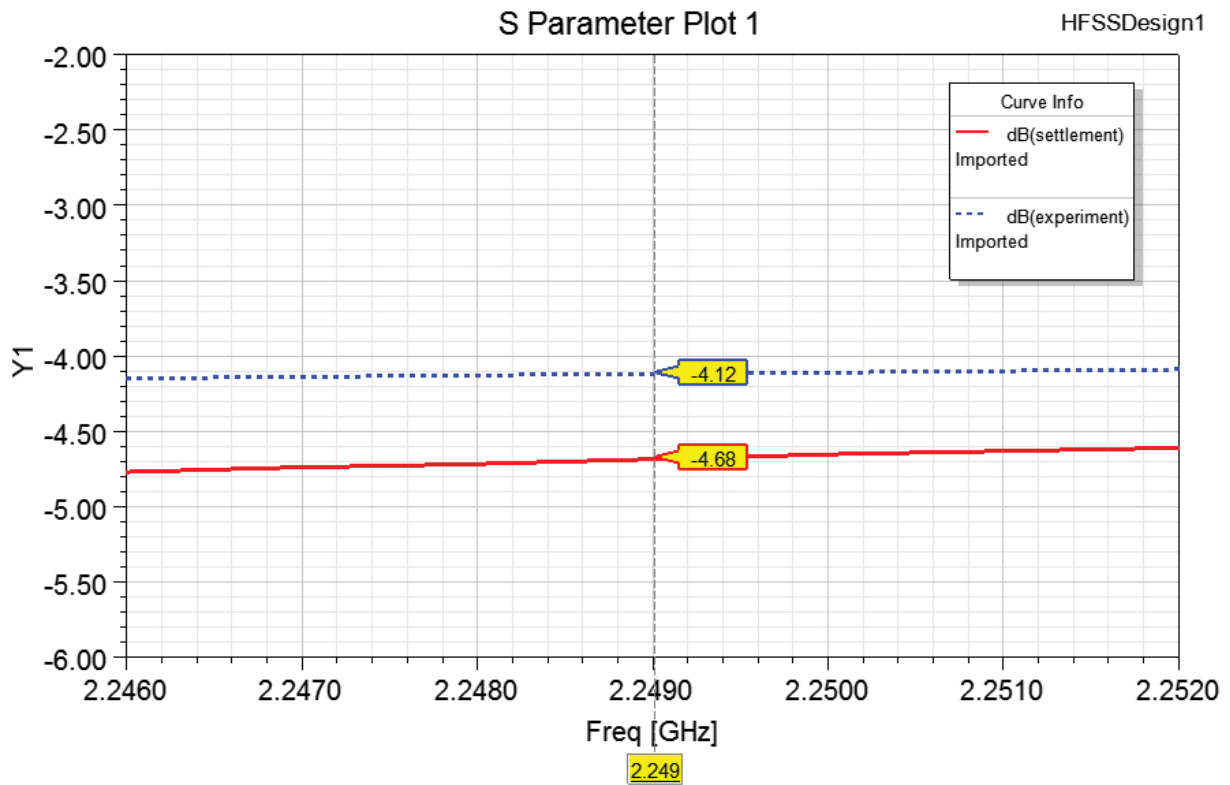
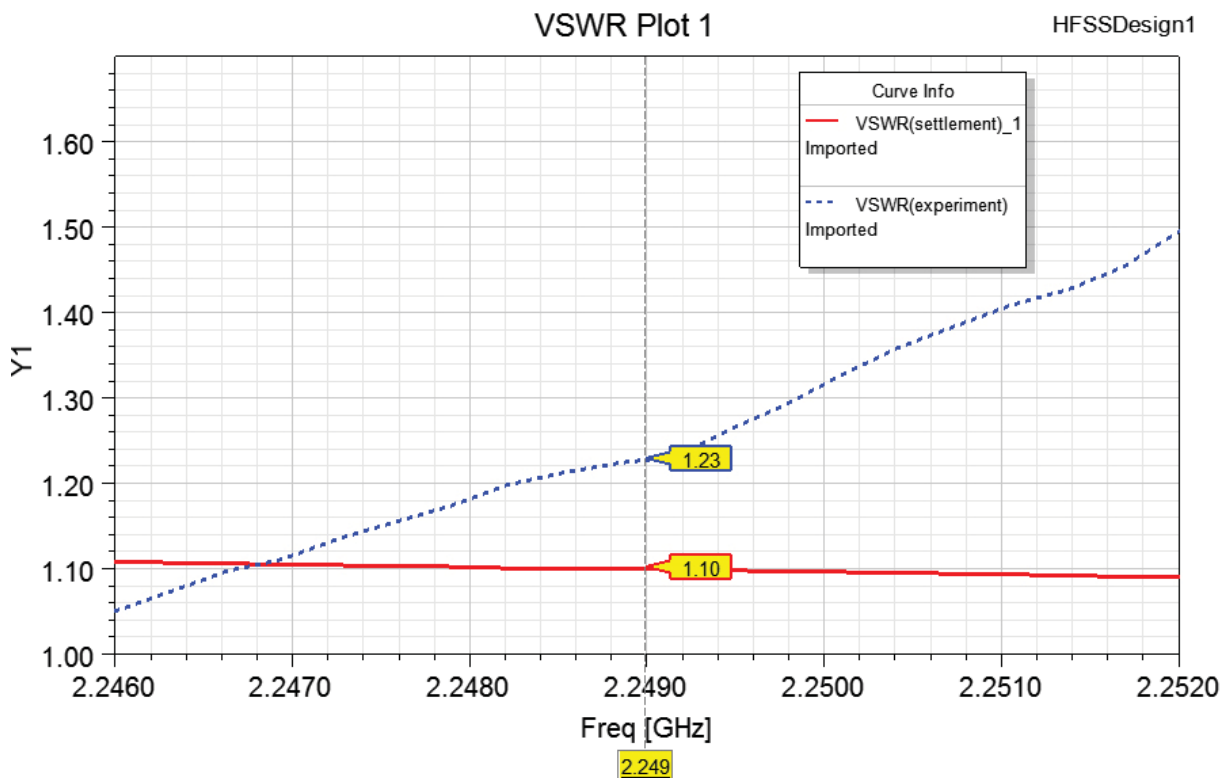


Рисунок 5. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных характеристик АН для радиопоглощающего материала XB-10.6: *a* – ослабление мощности; *b* – KCB



a



b

Рисунок 6. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных характеристик АН для радиопоглощающего материала ХВ-3.2: *a* – ослабление мощности; *b* – КСВ

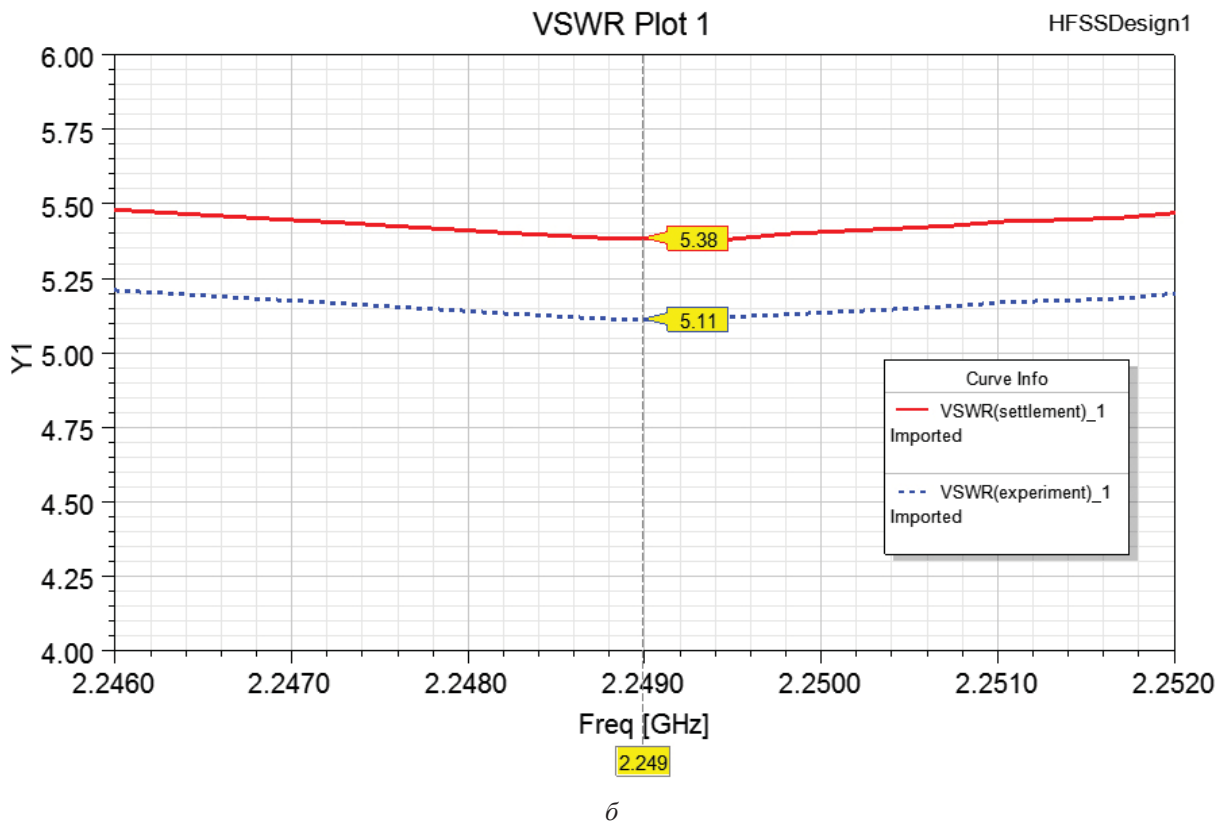
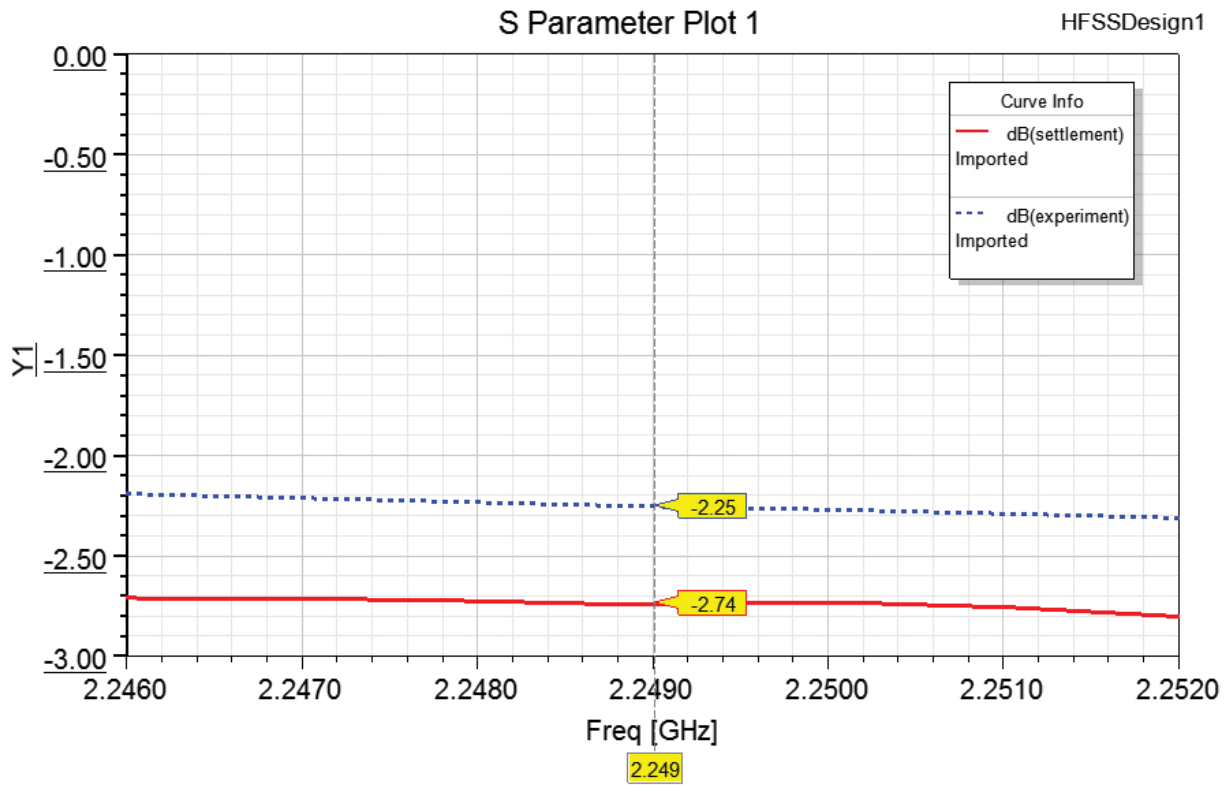


Рисунок 7. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных характеристик АН для радиопоглощающего материала XB-2.0: *a* – ослабление мощности; *b* – KCB

передающих устройств РТС РН при проведении длительных испытаний на стартовом комплексе космодрома. Наилучший результат определения положений и размеров настроечного элемента и элемента связи при помощи параметрического анализа показал невозможность настройки АН ($KCB = 5,38$).

При применении радиопоглощающего материала ХВ-10.6 в конструкции АН возможно добиться согласованного режима работы с бортовой антенной, но величина ослабления мощности в АН значительно превышает 5 дБ, что ухудшит мощностные характеристики РАФУ.

Литература

1. Решение задач по исключению паразитных каналов связи и смешивания сигналов РТС на входе приемника НИП при испытаниях на СК РН типа «СОЮЗ» / Д.С. Ключев [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21. № 4. С. 63–67.
2. Особенности построения схемы ретрансляции сигнала системы телеметрических измерений при нахождении ракеты-носителя под мобильной башней обслуживания / В.А. Неганов [и др.] // Актуальные проблемы ракетно-космической техники: материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Самара, 16–18 сентября 2013. С. 48–53.
3. Ключев Д.С., Мальцев А.С., Филиппов С.Б. Моделирование передающей антенной насадки в САПР «Ansys HFSS» // Актуальные вопросы телекоммуникаций: материалы научно-технической конференции «Росинфоком-2017». Самара, 2017. С. 162–163.
4. Ключев Д.С., Мальцев А.С., Филиппов С.Б. Моделирование и экспериментальное исследование передающей антенной насадки метрового диапазона частот в САПР «Ansys HFSS» // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2018): материалы VIII Международной заочной научно-технической конференции. Самара, 2018. С. 72–75.
5. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. М.: Солон-Пресс, 2005. 224 с.
6. Банков С.Е., Курушин А.А. Анализ и оптимизация СВЧ-структур с помощью HFSS // Журнал радиоэлектроники. 2009. № 1. С. 34–37.
7. Курушин А.А., Банков С. Е. Моделирование антенн и СВЧ-структур с помощью HFSS. М.: Солон-Пресс, 2019. 280 с.
8. Mur G. Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 1981. Vol. EMC-23. № 4. P. 377–382.
9. George P.L. Automatic Mesh Generation Application to Finite Element Methods. Masson: John Wiley & Son, 1991. 344 p.
10. Радиопоглощающие материалы. Характеристики радиопоглощающих материалов, используемых для создания средств защиты от ЭМИ РЧ и СВЧ. URL: <http://www.techexternal.ru/ewonas-1161-1.html> (дата обращения: 23.08.2020).
11. Пластины эластичные марок «ХВ». Технические условия. ТУ6-00-5761783-322-89. Введ. 01.01.1992. Владимирский центр стандартизации и метрологии.

Получено 23.08.2020

Мальцев Андрей Сергеевич, ведущий инженер-конструктор отдела разработки и испытаний антенно-фидерных устройств ракет-носителей и космических аппаратов АО «РКЦ «Прогресс». 443009, Российская Федерация, г. Самара, ул. Земеца, 18. Тел. +7 846 228-52-85. E-mail: malcev-tsskb@mail.ru

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF RADIO-ABSORBING MATERIALS IN THE DESIGNS OF ANTENNA NOZZLES

Maltsev A.S.

JSC Space Rocket Centre Progress, Samara, Russian Federation

E-mail: malcev-tsskb@mail.ru

The article presents the simulation results in the Ansys HFSS computer-aided design system of the S-band transmitting antenna attachment, which is necessary for testing antenna-feeder devices in conjunction with radio systems of launch vehicles or spacecraft at the technical or launch complex of the cosmodrome, where a mobile service tower. When designing the optimal design

of the antenna attachment, in addition to determining the size of the body, the optimal location and geometric characteristics of the communication element and the tuning element, the correct choice of radio-absorbing material is of great importance. The article presents the results of theoretical and experimental studies of the use of domestic radio-absorbing materials of the «XB» brand in the design of the S-band antenna attachment. It is shown that the optimal variant is the use of XB-3.2 radio-absorbing material in the S-band AN design for the onboard antenna of the radio-technical system of the space rocket, in which the maximum power absorption occurs in the range of higher frequencies, while the antenna attachment provides coordinated operation with the onboard antenna, and the power attenuation value does not exceed 5 dB.

Keywords: antenna nozzles, repeater antenna-feeder device, mobile maintenance tower of the launch complex, standing wave ratio, power attenuation, radio-tightness, radio-absorbing material

DOI: 10.18469/ikt.2020.18.3.12

Maltsev Andrey Sergeevich, JSC Space Rocket Centre Progress, 18, Zemetsa Street, Samara, 443009, Russian Federation; Leading Design Engineer of the Department of Development and Testing of Antenna-Feeder Devices for Launch Vehicles and Spacecraft. Tel. +7 846 228-52-85. E-mail: malcev-tsskb@mail.ru

References

1. Klyuev D.S. et al. The solution of problems on exclusion of parasitic communication channels and mixing of RTS signals at the input of the receiver of the NPC during tests on the SC LV of the SOYUZ type. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 63–67. (In Russian.)
2. Neganov V.A. et al. Features of the construction of the signal retransmission scheme of the telemetric measurement system when the launch vehicle is under the mobile service tower. *Aktual'nye problemy raketno-kosmicheskoy tekhniki: materialy III Vserossiyskoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii*, Samara, 16–18 September 2013, pp. 48–53. (In Russian.)
3. Klyuev D.S., Mal'tsev A.S., Filippov S.B. Modeling of the transmitting antenna attachment in CAD «Ansys HFSS». *Aktual'nye voprosy telekommunikatsij: materialy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Rosinfokom-2017»*, Samara, 2017, pp. 162–163. (In Russian.)
4. Klyuev D.S., Mal'tsev A.S., Filippov S.B. Modeling and experimental study of the transmitting antenna attachment of the meter frequency range in CAD «Ansys HFSS». *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii (ITRT-2018): materialy VIII Mezhdunarodnoj zaochnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii*, Samara, 2018, p. 72–75. (In Russian.)
5. Bankov S.E., Kurushin A.A., Razevig V.D. *Analysis and Optimization of 3D Microwave Structures Using HFSS*. Moscow: Solon-Press, 2005, 224 p. (In Russian.)
6. Bankov S.E., Kurushin A.A. Analysis and optimization of microwave structures using HFSS. *Zhurnal radioelektroniki*, 2009, no. 1, pp. 34–37. (In Russian.)
7. Kurushin A.A., Bankov S.E. *Simulation of Antennas and Microwave Structures with HFSS*. Moscow: Solon-Press, 2019, 280 p. (In Russian.)
8. Mur G. Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1981, no. 4, pp. 377–382.
9. George P.L. *Automatic Mesh Generation Application to Finite Element Methods*. Masson: John Wiley & Son, 1991, 344 p.
10. *Radio absorbing materials. Characteristics of radio-absorbing materials used to create means of protection against EMP RF and microwave*. URL: <http://www.techexternal.ru/ewonas-1161-1.html> (accessed 23.08.2020).
11. *Elastic plates, brands «XB». Specifications*. TU6-00-5761783-322-89. Applied 01.01.1992. Vladimirskij tsentr standartizatsii i metrologii.

Received 23.08.2020