

Алгоритм формирования рационального геометрического облика радиопрозрачного обтекателя носовой радиолокационной станции самолета

© А.В. Барабанов, С.А. Серебрянский

Московский авиационный институт (НИУ), Москва, 125993, Россия

Рассмотрен комплексный критерий оценки характеристик радиопрозрачного обтекателя (РПО) бортовой радиолокационной станции (БРЛС) сверхзвукового самолета. Сформирован алгоритм проведения исследования, результатом которого позволит установить взаимосвязь между радиотехническими, аэродинамическими и основными геометрическими характеристиками носовых радиопрозрачных обтекателей (удлинение носовой части фюзеляжа, угол наклона касательной к кривой-образующей тело вращения и дискриминанта кривой-образующей). Процесс формирования геометрического облика РПО БРЛС сверхзвукового самолета основывается на двух взаимосвязанных процессах: обеспечении требуемых радиотехнических характеристик обтекателя для выполнения требований к дальности обнаружения радиолокационной станции самолета и минимизации лобового сопротивления носовой части фюзеляжа. На основании результатов исследования по алгоритму, предложенному авторами настоящей статьи, возможно формирование технических рекомендаций по выбору рациональных геометрических параметров РПО БРЛС сверхзвукового самолета на ранних этапах проектирования летательных аппаратов.

Ключевые слова: радиопрозрачный обтекатель, радиолокационная станция, комплексный критерий, радиотехнические характеристики, аэродинамические характеристики, геометрический облик, рациональные параметры

Введение. При проведении государственных совместных испытаний (ГСИ) образцов авиационной техники военного назначения необходимо подтверждение заданных в тактико-техническом задании на самолет (ТТЗ) характеристик дальности обнаружения и точности пеленгации целей бортовой радиолокационной станцией (БРЛС). Следует учитывать, что одновременно тестируются другие характеристики самолета, и, как правило, на финальной стадии этапа подтверждения летно-технических характеристик (ЛТХ) при получении отрицательных результатов летных испытаний для обеспечения заданных характеристик БРЛС требуется доработка радиопрозрачного обтекателя (РПО).

Существует два принципиально разных подхода к доработке РПО:

- доработка конструкции стенки обтекателя (применение просветляющих слоев) для доведения РТХ РПО в нужных секторах до требуемых величин;

- доработка теоретических обводов (изменения формы продольного и поперечного сечений) для обеспечения в заданных секторах требуемых углов падения электромагнитного излучения локатора.

При этом в случае применения мероприятий второго подхода фактически будет изменен теоретический контур самолета и аэродинамические характеристики самолета (АДХ) головной части фюзеляжа, что может привести к повторному проведению этапа ГСИ по подтверждению ЛТХ самолета. Поэтому второй подход применяется только, если невозможно решить проблему при помощи доработки конструкции стенки РПО.

В настоящий момент существует два направления по проектированию РПО, имеющих научные школы, в которых изучают вопросы проектирования только с точки зрения достижения максимальных радиотехнических (первое направление) или аэродинамических (второе направление) характеристик:

- 1) разработка и оптимизация стенки РПО за счет рационального выбора материалов, составляющих композиционный пакет и применения специальных мероприятий по повышению РТХ обтекателя [1–6];

- 2) определение и оптимизация формы обтекателя с точки зрения минимизации лобового сопротивления головной части фюзеляжа самолета [7–8].

Проблема исследования заключается в том, что рациональными геометрическими параметрами обладает сбалансированный, с точки зрения уровня РТХ и АДХ, обтекатель. В данной статье авторы определили основной подход к решению необходимой для авиационной промышленности задачи.

Таким образом, в целях минимизации рисков срыва сроков проведения ГСИ самолета следует осознанно подходить к выбору проектных параметров радиопрозрачного обтекателя на ранних этапах проектирования, используя многокритериальную комплексную оценку, для этого необходимо:

- выбрать комплексный критерий оценки характеристик радиопрозрачного обтекателя (РПО) БРЛС сверхзвукового самолета с точки зрения как радиолокации, так и аэродинамики;

- выработать алгоритм проведения исследования, в рамках которого установить взаимосвязь между геометрическими характеристиками РПО и его аэродинамическими и радиотехническими;

- сформировать технические рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров в зависимости от технического задания на проектирование самолета, проверив результаты исследований.

Цели настоящей статьи — выбор комплексного критерия оценки характеристик РПО и создание алгоритма проведения дальнейших

исследований с целью формирования нового подхода к проектированию РПО и принципиально новой комплексной методики выбора его рациональных геометрических параметров.

Выбор комплексного критерия оценки характеристик радиопрозрачного обтекателя. Обтекатели самолета предназначены для защиты антенных устройств различных радиотехнических комплексов от внешнего воздействия скоростного напора воздуха, влаги, температуры, механических ударов и других воздействий, а также улучшения обтекаемости объектов (уменьшение аэродинамического сопротивления), на которых он установлен. Их применение позволяет существенно продлить срок службы антенн. Основными задачами проектирования обтекателей являются:

- обеспечение наибольшей радиопрозрачности;
- наименьшего аэродинамического сопротивления во всем диапазоне высот и скоростей полета при минимальной массе для обеспечения требуемой прочности и жесткости конструкции изделия.

Следовательно, комплексный критерий оценки характеристик радиопрозрачного обтекателя должен учитывать, с одной стороны, условия выполнения требований максимальной пропускной способности стенки РПО и рациональное распределение углов падения электромагнитной волны на стенку (рациональной формы с точки зрения РТХ), с другой стороны — требования минимального аэродинамического сопротивления носовой части самолета [9]. При этом каждая из составляющих интегрального критерия имеет свои граничные условия.

Согласно [10], критерии подразделяют на уровни в зависимости от сложности оценки, которую их величина может дать при анализе. На основании научно-технического задела в области исследования радиопрозрачных обтекателей выбирается комплексный критерий верхнего уровня оценки характеристик РПО.

Критерием первого уровня оценки РТХ РПО служит коэффициент пропускания (КП) стенки обтекателя [1, 11]. Он зависит в первую очередь от конструкции самой стенки (число слоев и тип материалов) и углов падения электромагнитной волны на стенку обтекателя, т. е. геометрических характеристик носовой части самолета ($\lambda_{\text{нос}}$ — удлинение РПО, d — дискриминанта кривой-образующей, θ — угол наклона касательной к кривой-образующей). Критерием второго уровня оценки РТХ РПО является угловая ошибка пеленга (УОП) цели с заданной эффективной площадью рассеяния (ЭПР) БРЛС самолета. Согласно [12], РТХ РПО оказывают существенное влияние на точность пеленгации не только самолетных РЛС, но и ракет противовоздушной обороны. Для достижения требуемых характеристик работы системы антенна — обтекатель были заданы четкие ограниче-

ния на указанные выше параметры: $КП \geq 0,8$; $УОП \leq 7^\circ$, которые не только участвуют в формировании комплексного критерия верхнего уровня оценки характеристик РПО, но и оказывают существенное влияние на алгоритм исследования. При применении существующих подходов формирования облика РПО это не учитывается на ранних этапах проектирования летательных аппаратов. Таким образом, критерий первого уровня оценки РТХ B^* , участвующий в формировании критерия верхнего уровня РПО, можно записать следующим образом:

$$B^* = \text{ArgMax} (КП(\lambda_{\text{нос}}, d, \theta)), \quad \{КП \geq 0,8; УОП \leq 7^\circ\}. \quad (1)$$

Критерием первого уровня оценки АДХ РПО является коэффициент лобового сопротивления носовой части самолета $C_x^{\text{нос}}$, который, как и критерий оценки РТХ, зависит от геометрических характеристик носовой части самолета ($\lambda_{\text{нос}}, d, \theta$) и вносит существенный вклад в аэродинамические характеристики в целом [13]:

$$C_x^{\text{давл}} = C_x^{\text{нос}} + C_x^{\text{корм}} + C_x^{\text{дон}},$$

где $C_x^{\text{давл}}$ — коэффициент полного аэродинамического сопротивления давления фюзеляжа; $C_x^{\text{нос}}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления давления носовой части фюзеляжа; $C_x^{\text{корм}}$ — коэффициент аэродинамического сопротивления давления кормовой части фюзеляжа; $C_x^{\text{дон}}$ — коэффициент донного аэродинамического сопротивления фюзеляжа.

Аналогично критерию первого уровня для оценки РТХ РПО данный критерий A^* можно записать так:

$$A^* = \text{ArgMin} (C_x^{\text{нос}}(\lambda_{\text{нос}}, d, \theta)). \quad (2)$$

Для проведения комплексного анализа характеристик РПО в качестве критерия верхнего уровня авторы настоящей статьи использовали отношения критериев первого уровня оценки РТХ (1) и АДХ (2), учитывая, что максимальное значение комплексного критерия будет означать рациональный выбор геометрических параметров РПО и соблюдая граничные условия согласно [1]. На основании выражений (1) и (2) комплексный критерий верхнего уровня можно записать в свернутом виде:

$$X^* = \text{ArgMax} (B^*/A^*), \quad \{КП \geq 0,8; УОП \leq 7^\circ\}.$$

В развернутом виде критерий верхнего уровня примет вид

$$X^* = \text{ArgMax} \left(\frac{\text{ArgMax} (КП(\lambda_{\text{нос}}, d, \theta))}{\text{ArgMin} (C_x^{\text{нос}}(\lambda_{\text{нос}}, d, \theta))} \right), \quad \{КП \geq 0,8; УОП \leq 7^\circ\}. \quad (3)$$

Выбранный комплексный критерий верхнего уровня (далее — аэродинамический коэффициент пропускания, АКП) позволяет полностью решить задачи исследования выбора рациональных геометрических параметров радиопрозрачных обтекателей:

$$X^* = \text{ArgMax} (\text{АКП}(\lambda_{\text{нос}}, d, \theta)), \quad \{ \text{КП} \geq 0,8; \text{УОП} \leq 7^\circ \}.$$

Вычисление максимальных значений АКП для различных высот и скоростей полета самолета позволит сформировать рекомендации по выбору рациональных геометрических параметров РПО.

Алгоритм проведения исследования геометрической формы обтекателя с учетом выбранного комплексного критерия. Для проведения исследований и поиска рациональной геометрической формы РПО по алгоритму, представленному на рис. 1, исходными данными являются:

1) назначения и задачи проектируемого летательного аппарата (ЛА), которые определяются в ТТЗ на самолет и оказывают существенное влияние на выбор состава комплекса бортового оборудования (КБО) в целом и БРЛС в частности;

2) выбор между пилотируемым и беспилотным ЛА, так как в случае пилотируемой машины появляется дополнительное ограничение на форму носовой части самолета — обеспечение требований к обзору летчика из кабины [14];

3) тип (активная фазированная антенная решетка, фазированная антенная решетка, целевая антенная решетка и т. д.) и модификация БРЛС. На основании выбора типа определяются апертура антенны БРЛС и, как следствие, один из важнейших параметров для построения носовой части самолета;

4) область высот и диапазон скоростей полета проектируемого ЛА, влияющих на требования к АДХ планера в целом и носовой части в частности [14];

5) современный уровень технологии и техники, который в рамках данного исследования определяет в первую очередь состав стенки обтекателя (число слоев, тип применяемых материалов) и технологию производства обтекателя [15]. Конструктивный материал обтекателя должен обеспечивать прочность конструкции во всем эксплуатационном диапазоне высот и скоростей полета и во всем диапазоне эксплуатационных перегрузок для защиты антенны БРЛС от внешнего воздействия.

На основании пп. 1–5 формируется блок исходных данных для начала проектирования носовой части ЛА.

По результатам анализа исходных данных строится модель носовой части самолета в первом приближении (рис. 2) [16]. В рамках данного исследования эта модель была параметризована, т. е. были определены взаимосвязи между геометрическими параметрами, изменение формы не требует перестроения всей геометрии, а достигается изменением значений переменных параметризации [17]. Для получения рациональной формы обтекателя необходимо многократно итерационно проводить его оценку РТХ и АДХ.

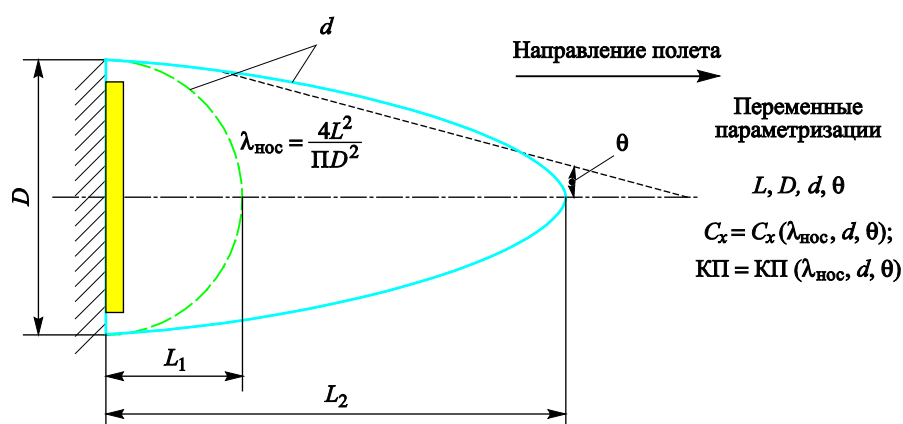


Рис. 2. Параметризация РПО:

D — эквивалентный диаметр, в котором установлена апертура БРЛС, L_1 — длина обтекателя малого удлинения, L_2 — длина обтекателя большого удлинения

Далее после формирования параметризованной модели была проведена проверка граничных условий РТХ ($\text{КП} \geq 0,8$; $\text{УОП} \leq 7^\circ$) и с помощью метода математического моделирования выполнены расчеты коэффициента пропускания и угловой ошибки пеленга. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результат проверки граничных условий РТХ

Номер образца	Геометрические параметры			РТХ	
	$\lambda_{\text{нос}}$	d	θ	КП	УОП
1	4	0,5	30°	0,6	13°
2	3	0,6	32°	0,85	7°

В случае если данные условия не выполняются, обтекатель с текущей геометрической формой не допускается для дальнейшего исследования (образец 1, см. табл. 1). Если граничные условия выполнены, то данный обтекатель допускается до этапа оценки АДХ и для него определяется критерий первого уровня оценки РТХ (1).

После выявления соответствия полученных характеристик граничным условиям проводится расчет АДХ обтекателя и определяется критерий первого уровня оценки АДХ (2), результаты этапа заносятся в табл. 1.

Затем определяется значение интегрального критерия верхнего уровня после определения критериев РТХ и АДХ первого уровня для обтекателя — аэродинамический коэффициент пропускания (3) и формируется итоговая таблица исследований (табл. 2).

Таблица 2

Результат определения комплексного критерия

Параметры	Значение для образца номер 2
Геометрические:	
$\lambda_{\text{нос}}$	3
d	0,6
θ	32°
РТХ:	
КП	0,85
УОП	7°
АДХ:	
$C_x^{\text{нос}}$	0,1
АКП	8,5

Далее геометрические параметры варьируются, изменяются переменные параметризации обтекателя, и начинается следующая итерация исследований обтекателя другой геометрической формы.

Исходной формой для первой итерации является РПО идеальной с точки зрения РТХ формы — полусферы (рис. 3). Финальной формой для заключительной итерации считается обтекатель такой геометрической формы, при которой не будут выполнены граничные условия ($\text{КП} \geq 0,8$; $\text{УОП} \leq 7^\circ$).

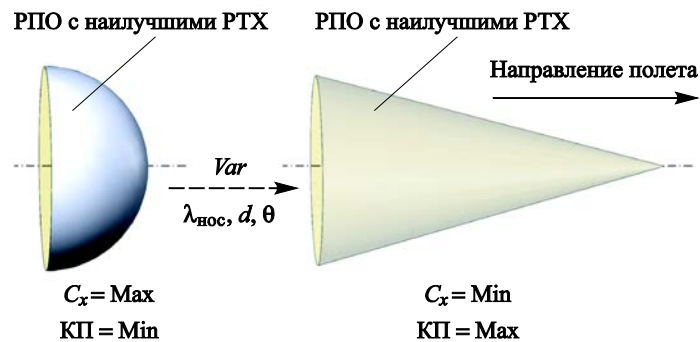


Рис. 3. Расчетные случаи формы итераций

После проведения финальной итерации формируется таблица результатов исследований (см. табл. 2), на основании которой строится функция зависимости АКП (3) от геометрических параметров формы обтекателя. Определение экстремума целевой функции позволит рассчитать рациональную форму обтекателя для проектируемого самолета.

Заключение. В рамках настоящей статьи показан выбор комплексного критерия оценки характеристик РПО БРЛС самолетов, который отражает наиболее выгодное сочетание аэродинамических и радиотехнических характеристик РПО. Также авторами данной статьи был сформирован алгоритм исследования геометрического облика РПО с целью создания методики выбора его рациональных геометрических параметров.

Проведение исследований геометрического облика РПО БРЛС по указанному выше алгоритму позволит выявить взаимозависимости между параметрами формы обтекателя и его АДХ и РТХ, а также через целевую функцию взаимозависимости аэродинамических и радиотехнических характеристик. На основании результатов исследований можно будет разработать технические рекомендации для выбора рациональной геометрической формы носовой части самолета на ранних этапах проектирования. Научно-технический задел, полученный в результате исследований, позволит решить задачу поиска компромисса между АДХ и РТХ радиопрозрачных обтекателей, необходимых для выполнения технического задания на характеристики радиолокационного комплекса и боевого применения самолета в целом.

Изменение блока исходных данных и проведение исследований для обтекателей самолетов другого класса позволят уточнить справедливость взаимозависимостей и применить данную методику вне зависимости от режимности летательного аппарата (дозвуковой, сверхзвуковой или гиперзвуковой).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Каплун В.А. *Обтекатели антенн СВЧ (Радиотехнический расчет и проектирование)*. Москва, Сов. радио, 1974, 240 с.
- [2] Погосян М.А., Барковский А.Ф., Рожков А.И., Поляков Ю.Г., Господарский С.А. *Антенный обтекатель, способ его изготовления и способ изготовления слоя антенного обтекателя*. Патент 2001121821/09 (Россия), 06.08.2001, опубл. 27.07.2002, Акционерное общество открытого типа «ОКБ Сухого», 11 с.
- [3] Басков К.М. *Современное электродинамическое сопровождение проектирования и изготовления систем антенна — радиопрозрачное укрытие*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016, 191 с.
- [4] Бойко М.А., Титов А.Н., Ястребов В.П. Обтекатели РЛС самолетов нового поколения. *Радиотехника*, 2002, № 11, с. 39–40.

- [5] Wu D.C.F. Plane wave Spectrum-Surface integration technique for Radome analysis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1974, no. 5, pp. 497–500.
- [6] Siwiak K. Boresight Errors Induced by Missile Radomes. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1979, vol. AP-27, no. 6, pp. 832–841.
- [7] Колесников Г.А., Марков В.К., Михайлюк А.А. *Аэродинамика летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1993, с. 300–501.
- [8] Бюшгенс Г.С. *Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов*. Москва, Физматлит, 1998, с. 817.
- [9] Барабанов А.В. Разработка методики выбора рациональных геометрических параметров носового обтекателя БРЛС малозаметного сверхзвукового самолета. *Гагаринские чтения — 2018. Сборник тезисов докладов*. Москва, Изд-во МАИ (НИУ), 2018, с. 34.
- [10] Вентцель Е.С. *Исследование операций*. 2-е изд. Москва, Наука, 1988, 208 с.
- [11] Басков К.М. *Современное электродинамическое сопровождение проектирования и изготовления систем антенна—радиопрозрачное укрытие*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016, 191 с.
- [12] Столбовой В.С., Турко Л.С., Залётин П.В. Пеленгационная характеристика системы «антенна-обтекатель» и пути повышения точности пеленгации радиолокационных объектов. *Вестник концерна ПВО «Алмаз-Антей»*, 2016, № 1, с. 52–60.
- [13] Артамонова Л.Г., Кузнецов А.В., Песецкая Н.Н. *Поверочный расчет аэродинамических характеристик самолета*. Москва, МАИ, 2010, с. 10–140.
- [14] МАК. *Авиационные правила, часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25)*. 5-е изд. с поправками 1–8, 2015, с. 288.
- [15] Басков К.М. (Россия). *Стенка радиопрозрачного укрытия*. Патент № 2459323, 04.05.2010, опубл. 20.08.2012., заяв. ИТПЭ РАН, с. 5–10.
- [16] Куликов Д.Д., Бабанин В.С. Создание параметрической модели детали в среде САД-системы. *Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики*, 2011, № 4 (74), с. 167–169.
- [17] Копорушкин П.А., Партин А.С. Алгоритм расчета параметризованных геометрических объектов. *Исследовано в России*, 2004, № 7, с. 184–197.

Статья поступила в редакцию 26.10.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Барабанов А.В., Серебрянский С.А. Алгоритм формирования рационального геометрического облика радиопрозрачного обтекателя носовой радиолокационной станции самолета. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 1. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-1-1948>

Барабанов Александр Владимирович — аспирант кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института (НИУ), инженер-конструктор 2-й категории ПАО «Компания «Сухой».
e-mail: barabanovav@outlook.com

Серебрянский Сергей Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института (НИУ). e-mail: s-s-alex@mail.ru, maksmai33@gmail.com

Algorithm of developing rational geometric shape of the radio transparent nose radar fairing for the aircraft

© A.V. Barabanov^{1,2}, S.A. Serebryanskiy¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

²PJSC Sukhoi Aviation Holding Company, Moscow, 125284, Russia

The paper considers a complex criterion for assessing the characteristics of the radio-transparent fairing of the supersonic aircraft onboard radar. The algorithm for research performing which will allow to establish interrelation between radio, aerodynamic and the main geometrical characteristics of radio-transparent nose fairings, such as lengthening of the forward part of a fuselage, an angle of inclination of a tangent to a curve forming a body of rotation and a discriminant of a curve generator is developed. The process of forming the geometric shape of the onboard radar radio-transparent fairing of a supersonic aircraft is based on two interrelated processes: providing the appropriate radio technical characteristics of the fairing to meet the requirements for the range of the aircraft radar detection and minimizing the drag of the nose of the fuselage. Research following the proposed algorithm allows forming technical recommendations for the selecting rational geometric parameters of onboard radar radio-transparent fairing of a supersonic aircraft at the early stages of aircraft design.

Keywords: radio-transparent fairing, radar, complex criterion, radio technical characteristics, aerodynamic characteristics, geometric shape, rational parameters

REFERENCES

- [1] Kaplun V.A. *Obtekateli antenn SVCh (Radiotekhnicheskiy raschet i proektirovaniye)* [Microwave antenna fairings (Radio engineering calculation and design)]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1974, 240 p.
- [2] Pogosyan M.A., Barkovsky A.F., Rozhkov A.I., Polyakov Yu.G., Gospodarsky S.A. *Antennyy obtekatel', sposob yego izgotovleniya i sposob izgotovleniya sloya antennogo obtekatelya* [Antenna fairing, method for its manufacture and method for manufacturing a layer of antenna fairing]. Patent RF 2001121821/09, 06.08.2001, Published 27.07.2002, Joint-stock company of open type "Sukhoi Design Bureau", 11 p.
- [3] Baskov K.M. *Sovremennoe elektrodinamicheskoe soprovozhdenie proektirovaniya i izgotovleniya system antenna — radioprozrachnoe ukrytie*. Diss. ... Kand. tekhn. nauk [Current electrodynamic support of design and manufacture of antenna-radio-transparent shelter systems. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Moscow, 2016, 191 p.
- [4] Boyko M.A., Titov A.N., Yastrebov V.P. *Radiotekhnika (Radioengineering)*, 2002, no. 11, pp. 39–40.
- [5] Wu D.C.F. Plane wave Spectrum-Surface integration technique for Radome analysis. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1974, no. 5, pp. 497–500.
- [6] Siwiak K. Boresight Errors Induced by Missile Radomes. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1979, vol. AP-27, no. 6, pp. 832–841.
- [7] Kolesnikov G.A., Markov V.K., Mikhayluk A.A. *Aerodinamika letatelnykh apparatov* [Aerodynamics of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 542 p.

- [8] Byushgens G.S., ed. *Aerodinamika, ustoychivost i upravlyaemost sverkhzvukovykh samoletov* [Aerodynamics, stability and control of supersonic aircraft]. Moscow, 1998, 816 p.
- [9] Barabanov A.V. Razrabotka metodiki vybora ratsionalnykh geometricheskikh parametrov nosovogo obtekatelya BRLS malozametnogo sverkhzvukovogo samoleta [Development of a method for selecting rational geometric parameters of the nose cone of the radar of a supersonic stealth aircraft]. *Gagarinskie chteniya–2018. Sbornik tezisov dokladov* [Gagarin readings–2018. Collection of abstracts]. Moscow, MAI Publ., 2018, p. 34.
- [10] Wentzel E.S. *Issledovanie oreratsiy* [Operation Research]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 206 p.
- [11] Baskov K.M. *Sovremennoye elektrodinamicheskoye soprovozhdeniye proyektirovaniya i izgotovleniya sistem antenna-radioprozrachnoye ukrytiye. Diss. ... kand. tekhn. nauk* [Modern electrodynamic support for the design and manufacture of antenna-radiotransparent shelter systems. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Moscow, 2016, 191 p.
- [12] Stolbovoy V.S., Turko L.S., Zaletin P.V. *Vestnik kontserna PVO “Almaz-Antey”* (*Almaz-Antey Concern of Air Defence Journal*), 2016, no. 1, pp. 52–60.
- [13] Artamonova L.G., Kuznetsov A.V., Pesetskaya N.N. *Poverochnyy raschet aerodinamicheskikh kharakteristik samoleta* [Confirmatory analysis of aircraft aerodynamic characteristics]. Moscow, MAI Publ., 2010, 136 p.
- [14] *Aviatsionnye pravila, chast 25. (AP-25)* [Aviation rules. Part 25. (AR-25)]. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii [Airworthiness standards for transport category aircraft]. Mezhsudarstvennyy aviatsionnyy komitet Publ., 2015, 5th edition with amendments 1-8.
- [15] Baskov K.M. *Stenka radioprozrachnogo ukrytiya* [Wall of radio-transparent shelter]. Patent RF No. 2459323, 04.05.2010. Published 20.08.2012.
- [16] Kulikov D.D., Babanin V.S., *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki — Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2011, no. 4 (74), pp. 167–169.
- [17] Koporushkin P.A., Partin A.S., *Elektronnyy zhurnal: Issledovano v Rossii — Electronic journal: Investigated in Russia*, 2004, no. 7, pp. 184–197. Available at: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/018>

Barabanov A.V., post-graduate student, Department of Design and certification of aviation equipment, Moscow Aviation Institute, design engineer, PJSC Sukhoi Aviation Holding Company. e-mail: barabanovav@outlook.com

Serebryanskiy S.A., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Design and certification of aviation equipment, Moscow Aviation Institute. e-mail: s-s-alex@mail.ru, maksmi33@gmail.com