

УДК 629.7.024

АНАЛИЗ СТОИМОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ТРЕКЕРА В СБОРКЕ АГРЕГАТА ПЛАНЕРА ВОЗДУШНОГО СУДНА ПО СРАВНЕНИЮ С ТРАДИЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ СБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ И БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КМ

В. А. ТЕРЕШОНКОВ¹, Д. А. ПРОКОПЕНКО²

¹tereshonkovva@mai.ru, ²prokopenkoda@mai.ru

ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Поступила в редакцию 09.08.2021

Аннотация: Представлен сравнительный анализ использования лазерного трекера в сборке агрегатов планера и традиционные методы сборки. Рассмотрен процесс сборки панели фюзеляжа транспортных самолетов разных размерностей. Выявлены основные проблемы традиционных методов сборки и представлены решения этих проблем в сборке с применением лазерного трека. Проведен расчет стоимости стапеля для сборки трех панелей фюзеляжа разных габаритов, а также стоимость сборки панели из композитных материалов по бесстапельной технологии. Оценка стоимости производства наглядно показывает преимущество внедрения в технологический процесс сборки самолетов технологий метрологической поддержки производства.

Ключевые слова: сборка; стоимость; лазерный трекер; фюзеляж; стапель; композит; безэталонная технология; бесстапельная сборка.

ВВЕДЕНИЕ

Любая авиационная техника должна выполнять высокие требования к качеству и точности изготовления конструкций. Для современных воздушных судов это является главным условием сборки и их последующего технического обслуживания в штатной эксплуатации, нештатных или аварийных ситуациях. Значимость соблюдения данных требований значительно увеличивается в условиях широкой внутрироссийской и международной кооперации при разработке самолетов последнего поколения.

Поскольку современные пассажирские и транспортные воздушные суда имеют значительные размеры и жесткости допуска при стыковке их составных частей, задача необходимого контроля положения базовых элементов этих конструкций требует создания новых, перспективных измерительных технологий и рационального их включения в уже сложившуюся структуру размерного контроля в самолетостроении.

Традиционные методы размерного контроля, применяемые в авиакосмической промышленности, требуют создания большого количества материалоемкой оснастки – макеты различных элементов летательного аппарата, шаблоны, контрольные и сборочные стенды, стапели. В отечественных авиационных предприятиях широко и часто используют промышленно-геодезические системы. Лазерные следящие системы используются не только как средство геометрического контроля готовых изделий и монтажа стапельной оснастки, но и как один из управляющих элементов автоматических сборочных линий. Применение таких технологий существенно сокращает время на процесс сборки и стыковки элементов, повышает качество общей сборки и надежность летательных аппаратов, вследствие чего произведенный продукт становится более конкурентоспособным на российском и международном рынке.

Использование современных измерительных систем не только снижает трудоемкость, но и возрастает скорость и достоверность результатов измерений. Нынешние цифровые измерительные технологии позволяют отказаться от значительного количества оснастки, шаблонов, макетов, эталонов, так как работают с САД-моделями объектов и легко интегрируются в безбумажное производство.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ АГРЕГАТОВ И ЭЛЕМЕНТОВ ПЛАНЕРА

В силу того, что воздушное судно является сложным техническим объектом, его сборка имеет факторы, которые влияют на емкость сборочных работ, их цикл и качество:

- во-первых, в процессе сборки планера применяется немалое количество стрингеров, обшивки, трубопроводов и других тонкостенных, длинномерных и маложестких деталей, которые прогибаются под действием силы тяжести из-за собственного веса и требуют использования специальных методов сборки и специальной оснастки;
- во-вторых, планер самолета состоит из трудной конструктивно-силовой схемы, которая изготавливается из большого числа нежестких деталей и элементов;
- в-третьих, для производства и сборки ступеней, монтажных эталонов и прочей оснастки необходимо приличное количество расходного материала, времени и труда (стоимость оснащения производства составляет до 30 % стоимости готового изделия);
- в-четвертых, в состав конструкции планера самолета может входить от 10 000 до 40 000 деталей, что показывает многодетальность и сложность конструкции всего транспортного самолета [1].

Ввиду скорого морального старения самолета и общего прогресса сборки летательных аппаратов необходима нередкая смена объектов изготовления (10–15 лет для гражданских и транспортных самолетов). Например, замена большого объема ручного труда на автоматизированное производство, а, следовательно, создание и запуск новой производственной линии.

Применение разделения труда и выполнение параллельных сборочных работ, вследствие, членение самолета на сборочные единицы, позволяет сократить цикл производства.

В производство самолета входят сборочные работы, которые подразделяются на: узловые, агрегатные и общую сборку. Данные сборочные работы завязаны на принципиальной схеме деления планера (рис. 1).

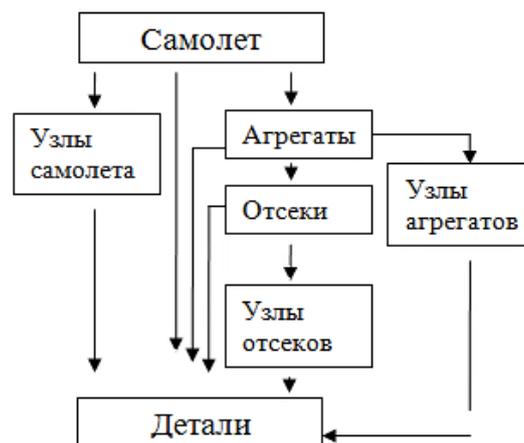


Рис. 1. Принципиальная схема деления планера самолета на части на этапе сборки

Узловая сборка. На этом этапе собираются такие сборочные единицы, как лонжероны, шпангоуты и панели. Трудоемкость этих работ составляет 12–15 % от всей трудоемкости изготовления планера самолета. При узловой сборке применяется достаточное количество механизированного и автоматизированного оборудования с инструментами, позволяющее существенно уменьшить трудоемкость сборки узлов, подузлов, панелей и сократить применение ручного труда на самой сборке.

Агрегатная сборка. Этот этап включает в себя сборку отсеков, секций, мелких, крупных агрегатов и соединение нескольких отсеков в один агрегат. Этот вид работ составляет порядка 18–32 % от общей трудоемкости.

Общая сборка самолета (сборка деталей). Этап содержит проведение окончательной сборки самолета из агрегатов, монтаж коммуникаций и оборудования на агрегатах, испытательные работы коммуникаций и оборудования на нормальное функционирование, а также нивелировочные работы. От всего объема работ по изготовлению самолетов трудоемкость работ по стыковке отсеков и агрегатов составляет 12–20 %.

Особенно трудоемким и дорогим этапом сборочных работ является агрегатная сборка, поскольку нелегко обеспечить механизацию сборочных работ и необходимо применение дорогостоящих автоматов [1].

РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СТАПЕЛЯ ДЛЯ СБОРКИ ПАНЕЛИ ФЮЗЕЛЯЖА

Определение стоимости сборки панели фюзеляжа для воздушного судна разной размерности зависит от конструкции и массы стапеля. Рассмотрим для начала типовую конструкцию стапеля для панели сборки фюзеляжа (рис. 2).

В среднем для сборки панели фюзеляжа используют:

- вертикальные колонны – 2 шт.;
- продольные балки – 4 шт.;
- базовые плиты для установки стыковых шпангоутов – 2 шт.;
- кронштейны-фиксаторы – 12 шт.;
- рубильники – 12 шт.

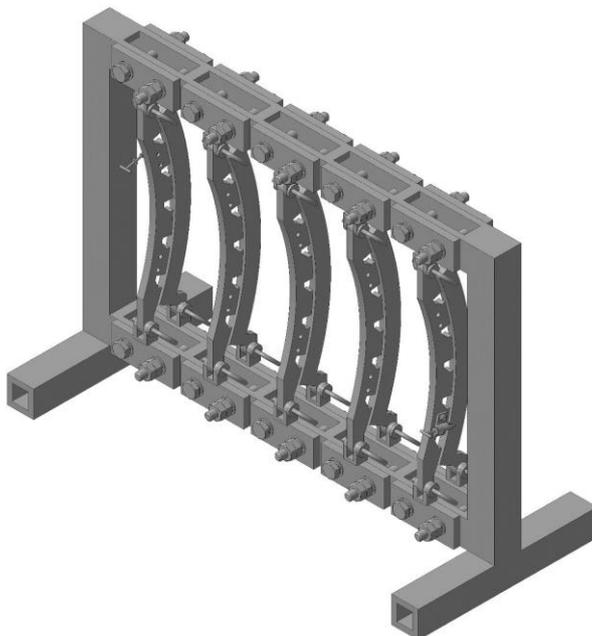


Рис. 2. Типовая конструкция стапеля

Произведем расчет оценки массы стапеля для панели воздушного судна разной размерности (рис. 3).

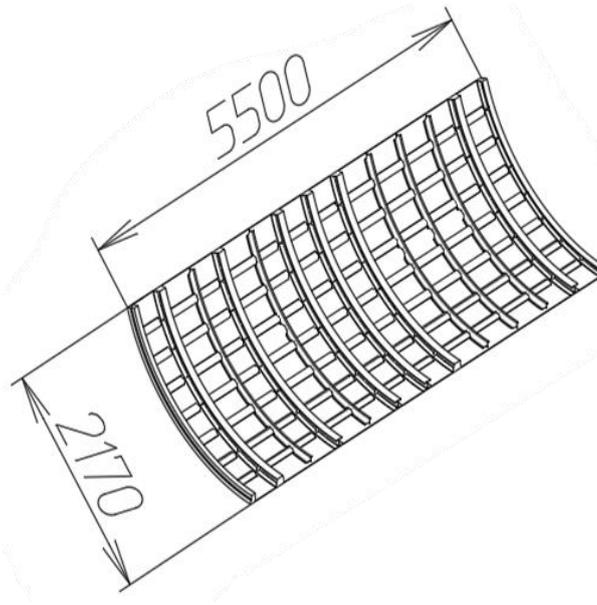


Рис. 3. Габаритные размеры панели

Зная габаритные размеры панели, можем оценить параметры деталей стапеля и их массу (1). Например, геометрия рубильника (рис. 4).

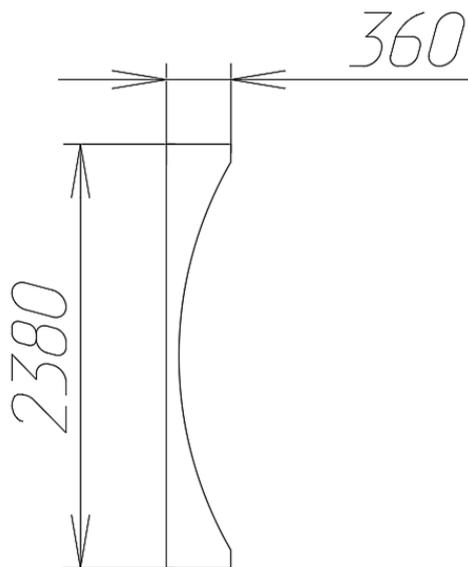


Рис. 4. Геометрия рубильника

Примем в качестве материала стальной сплав и толщину полотна рубильника 30 мм. Тогда масса одного рубильника:

$$m_{\text{рубильника}} = \frac{S_{\text{рубильника}} \times B_{\text{рубильника}} \times \rho_{\text{стали}}}{1000} = \frac{427761 \times 30 \times 7,7}{1000} = 97,91 \text{ кг.} \quad (1)$$

Масса всех 12-ти рубильников:

$$m_{\text{рубильников}}^{\Sigma} = 97,91 \times 12 = 1185,75 \text{ кг.} \quad (2)$$

По аналогичной методике (1) и (2) рассчитаем массу остальных деталей и сведем результаты в табл. 1. Зная габаритные размеры панели, можем оценить параметры деталей стапеля и их массу. Обозначим этот стапель № 1.

Таблица 1

Масс деталей стапеля № 1

	<i>Кол.</i>	<i>Масса ед., кг</i>	<i>Масса, кг</i>
Рубильник	11	98,8	1086,9
Вертикальная колонна	2	768,8	1537,5
Продольная балка	4	1744,5	6978,0
Базовая плита	2	106,7	213,4
Кронштейны-фиксаторы	11	4,2	45,7
	Итого:		9861,7

Аналогично рассчитаем массу стапеля № 2 для схожей панели меньшей размерности, к примеру, для самолетов Ан-26, и сведем результаты в табл. 2.

Таблица 2

Масса деталей стапеля № 2 меньшей размерности

	<i>Кол.</i>	<i>Масса ед., кг</i>	<i>Масса, кг</i>
Рубильник	12	24,7	296,5
Вертикальная колонна	2	258,7	517,4
Продольная балка	4	1111,0	4444,2
Базовая плита	2	53,4	106,8
Кронштейны-фиксаторы	12	2,8	33,3
	Итого:		5398,1

Аналогично рассчитаем массу стапеля № 3 для схожей панели большей размерности, к примеру, для самолетов Ил-76, и сведем результаты в табл. 3.

Таблица 3

Масса деталей стапеля № 3 большей размерности

	<i>Кол.</i>	<i>Масса ед., кг</i>	<i>Масса, кг</i>
Рубильник	21	376,6	7907,9
Вертикальная колонна	2	1596,7	3193,3
Продольная балка	4	3518,6	14074,4
Базовая плита	2	461,8	923,6
Кронштейны-фиксаторы	21	4,2	87,3
	Итого:		26186,5

Цена стали за 1 тонну составляет 67850 руб (информация взята из открытых источников). Стоимость материала на 1 стапель для сборки панели фюзеляжа составит:

$$C_{\text{материала}} = m_{\text{стапеля}}^{\Sigma} \times C_{\text{материала}}^{\text{кг}} \quad (3)$$

Стоимость производства стапеля составляет 1,8 от цены за материал для его изготовления. Произведем расчет (3) для всех трех случаев и сведем результаты в табл. 4.

Таблица 4

Результаты стоимости стапеля

	<i>Стоимость материала, руб</i>	<i>Стоимость производства стапеля, руб</i>	<i>Стоимость стапеля суммарная, руб</i>
Стапель 1 (исходный)	669113	1204404	1873517
Стапель 2 (меньших размеров)	366262	659273	1025535
Стапель 3 (больших размеров)	1776755	3198159	4974914

В авиастроении невозможно обойтись без сборочных стандов и стапельной оснастки. В большинстве случаев ранее и сейчас применяли и используют эталоны, полномасштабные макеты, шаблоны и специальные заливочные станды для монтажа стапельной оснастки. При работе по эталонной технологии необходимо наличие помещений довольно большого размера для хранения их от стыковки для проведения ремонтно-плановых работ на стандах и постоянный контроль геометрических характеристик эталонов. Выход из строя одного узла на стенде требует закладки целого эталонного макета, на что тратится порой несколько недель, это безусловно несет урон предприятию.

При применении лазерных трекеров для монтажа стапельной оснастки и в стандах стыковки, эталоном служит 3D-модель стапеля или летательного аппарата, что уменьшает площадь хранения, не использует большое число трудозатратных процедур контроля и ремонта эталонов, которые проводятся каждый год. Весомое ускорение процесса монтажа, увеличение качества и сокращение обслуживающего персонала можно достичь при использовании безэталонной технологии сборки стапеля. Помимо этого с использованием безэталонной технологии растет эластичность стапельной оснастки, делается легкодоступным внесение изменений конфигурации в конструкцию без больших расходов и в достаточно короткие сроки. Значительно сокращается время при планировании ремонтных работ, которые проходят с частотой от 6 месяцев. Достаточно осуществить проверку всех элементов и деталей оснастки по контрольным точкам, и в случае недочета исправить только те составляющие, которые не удовлетворяют данному допуску конкретной конструкторской документации.

Проведем оценку стоимости сборки панели из КМ по бесстапельной технологии. Техпроцесс производства панели с контролем внешних обводов включает в себя следующие действия:

- укладка препрега обшивки в ложемент;
- выкладка стингеров с помощью пенных заполнителей;
- установка препрегов арок типовых шпангоутов;
- размещение препрега панели в эластичную диафрагму;
- автоклавное формирование панели;
- установка арок силовых шпангоутов на панель;
- изъятие собранной панели из ложемента.

Контроль размеров и допусков в этом случае осуществляется с помощью лазерного трекера (рис. 5).

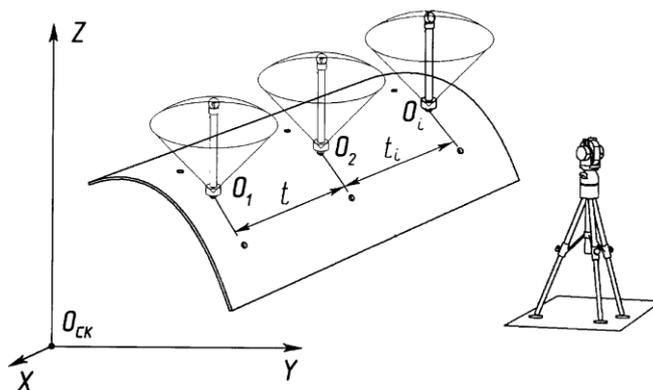


Рис. 5. Пример расположения реперных точек панели фюзеляжа на корпусе изделия с лазерным трекером

В координатоопределяющих системах на базе электронного тахеометра и лазерного трекера реализуется метод пространственной полярной засечки. По результатам измерений точек в системе координат прибора вычисляются геометрические положения съемочных точек [2]. Далее, при сравнении проектных координат характерных точек объекта и их фактических положений, координаты всех замеренных точек перевычисляются в систему координат самолета. Тип применяемого прибора зависит от многих факторов и выбирается под конкретную задачу.

Навык использования аналогичных систем демонстрирует, собственно что тахеометр, трекер, измерительный манипулятор успешно дополняют друг друга и вместе способны решать самый размашистый круг измерительных задач в самых тяжелых производственных условиях [3].

В рамках этой статьи не будем учитывать стоимость ложементов, автоклава и прочего оборудования. Стоимость лазерного трекера (4) и (5), например, FARO Vantage, возьмем из открытых источников [4]:

$$C = 867\,781 \text{ руб.} \quad (4)$$

Комплект сопутствующих материалов составит 0,25 от стоимости трекера. Итого стоимость составляет:

$$C = 1\,084\,726 \text{ руб.} \quad (5)$$

Выведем полученные результаты на диаграмму (рис. 6.)

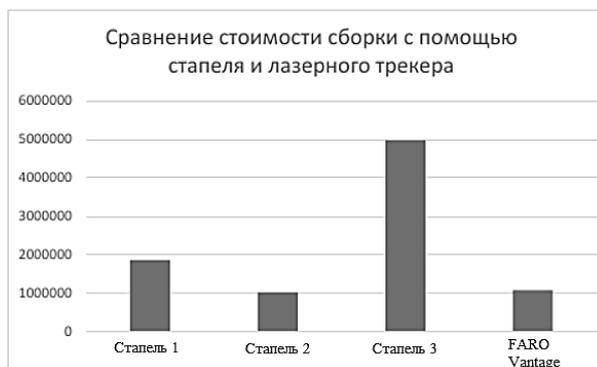


Рис. 6. Сравнение стоимости сборки с помощью стапеля и лазерного трекера

Диаграмма наглядно показывает, что сборка панели из КМ с помощью лазерного трекера дешевле в 2 раза. Такой результат был получен в частном случае, однако он легко экстраполируется на процесс производства самолета в целом. Благодаря метрологической поддержке производства, уменьшается количество оснастки, необходимой для производства различных

агрегатов, особенно на такие воздушные суда большой размерности, как Ил-76. В этом случае один стапель дороже лазерного трекера в 4,5 раз.

Однако, в случае с самолетом меньшей размерности (Ан-26) стоимость производства стапеля сопоставима со стоимостью лазерного трекера, поэтому в данном случае нецелесообразно переоборудовать производственную линию из-за больших затрат на внедрение в работу лазерных трекеров, ПО для них и обучение персонала. Отдельно необходимо отметить, что лазерный трекер – универсальный инструмент для любого типа воздушного судна, в то время как стапели разрабатываются отдельно на каждое изделие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная оценка стоимости производства наглядно показывает преимущество внедрения в технологический процесс сборки воздушного судна технологий метрологической поддержки производства. Помимо упрощения и физического облегчения процесса сборки узлов и агрегатов также уменьшается время нахождения изделия на сборке. Еще одним преимуществом можно отметить то, что использование лазерных трекеров в перспективе позволяет полностью автоматизировать процесс производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусева Р. И.** Особенности технологии сборки планера самолета: учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 133 с. [R. I. Guseva, *Features of the technology of assembling the airframe of the aircraft: a tutorial*, (in Russian). Komsomolsk-on-Amur: FGBOU VPO "KnAGTU", 2013.]
2. **Владимирова М. Р., Алейникова И. Ю., Калинина И. В.** Автоматизация топографических съемок. Часть 1. Работа с электронным тахеометром: учебно-методическое пособие. М.: МИИГАиК, 2018. 36 с. [M. R. Vladimirova, I. Yu. Aleinikova, I. V. Kalinina, *Automation of topographic surveys. Part 1. Working with an electronic tacheometer: teaching aid*, (in Russian). Moscow: MIIGAIK, 2018.]
3. **Шемонаева Е. С., Аушкин Г. И.** О способах контроля точности при окончательной сборке изделий ракетно-космической техники // XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти акад. С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. С. 452. [E. S. Shemonaeva, G. I. Aushkin, "On methods of accuracy control in the final assembly of rocket and space technology products", (in Russian), in *XLI Academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of Acad. S. P. Korolev and other outstanding Russian scientists - pioneers of space exploration: a collection of abstracts Moscow State Technical University named after N. E. Bauman*, 2017, p. 452.]
4. **Официальный сайт** продажи лазерного трекера FARO Vantage. [Электронный ресурс]. URL: <https://era-3d.ru> (дата обращения 03.05.2018). [The official website for the sale of the FARO Vantage laser tracker (2018, May 03). [Online]. Available: <https://era-3d.ru>]
5. **Отраслевое агентство «АвиаПорт».** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aviaport.ru/digest/2009/12/21/187524.html> (дата обращения 03.05.2018). ["AviaPort" branch agency (2018, May 03). [Online]. Available: <https://www.aviaport.ru/digest/2009/12/21/187524.html>]

ОБ АВТОРАХ

ТЕРЕШОНКОВ Владимир Андреевич, ассист. каф. 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Иссл. в обл. применения эффективных пассажирских конструкций при поражении боевыми веществами.

ПРОКОПЕНКО Денис Алексеевич, ассист. каф. 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Иссл. в обл. разработки беспилотного летательного аппарата для специального назначения

METADATA

Title: Analysis of the cost of using a laser tracker in the assembly of an aircraft airframe assembly compared to traditional assembly methods with and without the use of CM.

Authors: V. A. Tereshonkov¹, D. A. Prokopenko²

Affiliation: Moscow Aviation Institute (National Research University)

Email: ¹tereshonkovva@mai.ru, ²prokopenkoda@mai.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 3 (93), pp. 80-88, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The paper presents a comparative analysis of the use of a laser tracker in the assembly of airframe units and traditional assembly methods. The process of assembling the fuselage panel for transport aircraft of different dimensions is considered. The main problems of traditional assembly methods are identified and solutions to these problems in assembly using a laser track are presented. The cost of a slipway for assembling three fuselage panels of different dimensions was calculated, as well as the cost of assembling a panel from composite materials using slipless technology. Estimation of the production cost clearly shows the advantage of introducing metrological production support technologies into the aircraft assembly process.

Key words: assembly; cost; laser; fuselage; slipway; composite; technology; tracker; referenceless; slip-less.

About authors:

TERESHONKOV, Vladimir Andreevich, assist. of the Dept. 101 "Design and certification of aviation technology" Moscow Aviation Institute (National Research University). Research in the region the use of effective passenger structures in case of damage to combat equipment.

PROKOPENKO, Denis Alexeyevich, assist. of the Dept. 101 "Design and certification of aviation technology" Moscow Aviation Institute (National Research University). Research in the region development of an unmanned aerial vehicle for special purposes.