

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.40.02

УДК 621.452.3.01

**В.А. Куртеев¹, Б.Г. Мозеров¹, М.И. Соколовский¹,
А.А. Иноземцев²**

¹ПАО «Научно-производственное объединение „Искра“», Пермь, Россия

²ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

ОЦЕНКА ЗАЩИТНОЙ СПОСОБНОСТИ КОРПУСА ВЕНТИЛЯТОРА ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрена задача по удержанию оторвавшейся лопатки вентилятора турбореактивного авиационного двигателя для обеспечения безопасности пассажиров и экипажа самолета. Описана конструктивная схема, проведены расчеты прочности и степени поглощения энергии удара оторвавшейся лопатки специально разработанным устройством в виде гофрированного защитного пакета (или чехла) из высокопрочной ткани, который может быть установлен на любую конструкцию корпуса вентилятора как из металлических, так и композиционных материалов без принципиальных изменений схемы компоновки. Рассмотрены методики расчета стенки на пробитие оторвавшейся лопаткой, показано различие результатов расчета по одной из методик и эксперимента для пластичных металлов. Предложена методика расчета металлического корпуса, учитывающая предельную деформацию металла, а также методика расчета комбинированного корпуса, содержащего гофрированный защитный пакет из высокопрочной ткани. Описана проблема применения пластикового композиционного материала для силового корпуса вследствие его резания лопатками вентилятора при отрыве одной из лопаток.

Ключевые слова: корпус вентилятора, лопатка, гофрированный защитный пакет (чехол), композиционный материал, оболочка, ткань, предельная деформация, предел прочности, работа деформирования, кинетическая энергия, защитная способность.

**V.A. Kurteev¹, B.G. Mozerov¹, M.I. Sokolovskiy¹,
A.A. Inozemtsev²**

¹PJSC “Research and Production Association ISKRA”,
Perm, Russian Federation

²OJSC “Aviadvigatel”, Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF PROTECTIVE ABILITY OF TURBOJET FAN CASE

The problem on holding the torn vane of turbojet fan to ensure passengers and crew's safety is studied. The construction arrangement is described. It is performed strength analysis and calculations on impact energy absorption of torn vane by special goffer protective cover made of high-strength cloth. The protective cover can be installed on any fan case both of metal and composite materials without principal changes in structural configuration. The procedures for calculation of wall breaking by torn vane are considered. The difference between procedure's calculation results and experimental data for ductile metals are demonstrated. The procedure on calculation of metal case with allowance for the

ultimate strain, as well as procedure on calculation of combined metal case containing protective cover made of high-strength cloth are offered. The application of plastic composite to avoid puncture of load-carrying case by torn vane of fan is describe.

Keywords: fan case, vane, goffer protective cover, composite material, shell, cloth, ultimate strain, ultimate strength, deformation work, kinetic energy, protective ability.

Требование международных норм по удержанию оторвавшихся лопаток вентилятора турбореактивного двигателя для обеспечения безопасности пассажиров и экипажа самолета вызвало поиск принципиально новых конструктивных решений, обеспечивающих надежность удержания лопаток при минимальной массе конструкции корпуса вентилятора, выполненной при жестких габаритных ограничениях.

Кинетическая энергия движущейся оторвавшейся лопатки расходуется на работу деформирования и разрушения конструкции корпуса вентилятора (далее – корпус). Для современных авиадвигателей уровень энергии гашения одной лопатки составляет не менее

$$A_{\text{разр}} = W_{\text{max}} - W_{\text{над}} = 170 \text{ кДж},$$

где $W_{\text{max}} = 270 \text{ кДж}$ – полная максимальная кинетическая энергия оторвавшейся лопатки; $W_{\text{над}} = 100 \text{ кДж}$ – кинетическая энергия надполоточной части разрушенной лопатки.

Анализ методик расчета на пробитие стенки оторвавшейся лопаткой

Наиболее простое решение по удержанию оторвавшихся лопаток заключается в увеличении толщины стенки корпуса, при которой она не будет пробита хотя бы одной лопаткой. Один из подходов к расчету толщины стенки преграды [1] основан на предположении о том, что максимальный прогиб стенки преграды в зоне соударения пропорционален толщине стенки:

$$u = k \cdot \delta,$$

где k – эмпирический коэффициент (для металлов $k = 2,5$ [1]); δ – толщина стенки корпуса.

Для применяемых металлических материалов корпуса на основе титановых сплавов усилие среза материала стенки можно определить по формуле

$$N = L \cdot \delta \cdot \tau_B^{\text{дин}},$$

где L – периметр зоны среза оболочки корпуса, равный периметру соприкасаемой поверхности лопатки (фрагмента); $\tau_B^{\text{дин}} = 1,3 \cdot \tau_B$ – динамический предел прочности материала корпуса при срезе; $\tau_B = 0,6 \cdot \sigma_B$ – предел прочности материала корпуса при срезе; σ_B – предел прочности материала корпуса при разрыве (растяжении).

Тогда кинетическая энергия оторвавшейся лопатки

$$W = 0,5 \cdot m \cdot v^2, \quad (1)$$

где m – масса оторвавшейся лопатки (или ее фрагмента); v – линейная скорость центра массы оторвавшейся лопатки (или ее фрагмента), будет затрачена на работу изгиба оболочки корпуса

$$A_{\text{изг}} = 0,5 \cdot N \cdot u$$

и работу среза оболочки корпуса

$$A_{\text{ср}} = N \cdot \delta. \quad (2)$$

Исследования показали, что при уровне линейной скорости от 270 до 320 м/с работа среза ниже величины, определенной по соотношению (2), поэтому для нее был введен эмпирический коэффициент e (для металлов $e = 0,7$ [1]). Тогда полная работа разрушения корпуса примет вид

$$A = \delta \cdot N \cdot (0,5 \cdot k + e). \quad (3)$$

Приравнивая соотношения (1) и (3), необходимую толщину оболочки (стенки), обеспечивающую непробитие, определим как [1]

$$\delta = \sqrt{\frac{0,64 \cdot m \cdot v^2}{L \cdot \sigma_B \cdot (0,5 \cdot k + e)}}. \quad (4)$$

Формула Нобля [2] по расчету толщины металлических слоев основана на механизме выбивания пробки и имеет следующий вид для скорости пробития преграды:

$$v_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\pi \cdot \sigma_{\text{сд}} \cdot d}{\sqrt{3} \cdot m}} \cdot \delta, \quad (5)$$

где σ_{sd} – динамический предел текучести материала; d – калибр сердечника пули (поперечный размер осколка); m – масса сердечника пули (осколка); δ – толщина слоя (преграды).

Методики расчета стенок бронекламер [3] практически аналогичны вышеприведенным и включают в себя величины эмпирических коэффициентов для различных материалов (дерево, кирпич, бетон, металл).

Исследованиями установлено, что для различных вариантов применения металлических сплавов для бронезащиты требования по физико-механическим и технологическим характеристикам могут существенно различаться, но неизменным остается необходимость использования сплавов с возможно более высокой твердостью (а значит, и прочностью) при сохранении или повышении пластичности и запаса вязкости сплавов в условиях климатических температур [4].

В соотношениях (4) и (5) используется только одна из вышеуказанных характеристик материала – прочность, а характеристики материала, описывающие пластичность и вязкость, не учитываются.

Лабораторные испытания на пробитие пуль 9,0 Пст (параметры согласно работе [2]) плоских стенок толщиной 4 мм из титановых сплавов ВТ6 (предел прочности не менее 950 МПа) и ОТ4-0 (предел прочности не менее 700 МПа) показали различие в результатах расчета и эксперимента, а также в размерах пробитых отверстий. В первом случае периметр зоны среза стенки не совпал с периметром пули (что не подтверждает модель разрушения по методикам [1, 2]) – в стенке образовалось отверстие диаметром около 50 мм без видимой остаточной деформации (прогиба). Во втором случае в стенке образовалась вмятина в виде воронки высотой 15–20 мм с пулевым отверстием, диаметр основания воронки также составил около 50 мм. В обоих случаях стенки были пробиты, хотя по соотношению (4) (табл. 1) для стенки из сплава ВТ6 достаточно было толщины 2,7 мм.

В табл. 1 приведены также результаты расчета толщин по соотношению (4) и результаты эксперимента натуральных корпусов на пробитие фрагментами лопатки для нескольких уровней кинетической энергии.

Таблица 1

Результаты расчета толщин по соотношению (4) и результаты эксперимента натуральных корпусов и плоских стенок на пробитие

Номер опыта	Поражающий элемент	Кинетическая энергия, кДж	Материал стенки	Толщина стенки, мм		Состояние стенки
				Расчет	Эксперимент	
1	Фрагмент лопатки	100,0	ВТ6	11,8	9,5	Пробитие
2		170,0	ОТ4-0	17,3	8,0	Пробитие
3	Лопатка	270,0	ВТ6	19,4	–	–
4			ОТ4-0	21,8	13,0	Непробитие
5	Пуля 9,0 Пст	0,3	ВТ6	2,7	4,0	Пробитие
6			ОТ4-0	3,0	4,0	Пробитие

Оценка на пробитие стенки с учетом пластичности металла

Проведенные испытания показали, что материал стенки деформируется вокруг точки контакта с пулей на размере краевой зоны (зона, воспринимающая действие изгибающего момента). Тогда работа деформирования и разрушения металлических оболочек может быть определена по формуле

$$A_{\text{кор}} = 0,5 \cdot \Delta l \cdot L \cdot \delta \cdot \sigma_B^{\text{дин}}, \quad (6)$$

где $\Delta l = 2 \cdot l_{\text{кр}} \cdot \varepsilon_B$ – величина удлинения оболочки в зоне соударения; $l_{\text{кр}}$ – длина краевой зоны: $l_{\text{кр}} = 2,5 \cdot \sqrt{R \cdot \delta}$ – длина краевой зоны для цилиндрической оболочки [5]; $l_{\text{кр}} = 0,65 \cdot \delta \cdot \sqrt{E / \sigma_s}$ – длина краевой зоны для плоской стенки [6]; R и δ – радиус и толщина оболочки; E и σ_s – модуль упругости и предел текучести материала оболочки; ε_B – предел удлинения материала оболочки при растяжении; L – периметр зоны среза оболочки корпуса, равный периметру соприкасаемой поверхности лопатки (фрагмента); $\sigma_B^{\text{дин}} = 1,3\sigma_B$ – динамический предел прочности материала оболочки.

Приравнявая соотношения (1) и (6), необходимую толщину стенки цилиндрического корпуса, обеспечивающую непробитие, определим как

$$\delta = \left(\frac{0,15 \cdot m \cdot v^2}{\sqrt{R} \cdot \varepsilon_B \cdot L \cdot \sigma_B} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (7)$$

Сравнивая соотношения (4), (5) и (7), можно отметить, что последнее учитывает деформационные свойства металла. Применительно к плоской стенке и жесткому металлу расчетные соотношения толщины стенки с учетом предельной деформации материала имеют отличный от соотношения (7) вид, в данной работе они не приводятся. При этом результаты расчета по ним приведены в табл. 2, из которой видно совпадение их с результатами эксперимента.

Таблица 2

Результаты расчета по методике НПО «Искра» цилиндрических и плоских стенок на пробитие

Номер опыта	Поражающий элемент	Кинетическая энергия, кДж	Материал стенки	Толщина стенки, мм		Состояние стенки
				Расчет	Эксперимент	
3	Лопатка	270,0	BT6	15,5	–	–
4			OT4-0	10,5	13,0	Непробитие
5	Пуля 9,0 Пст	0,3	BT6	4,5	4,0	Пробитие
6			OT4-0	4,0	4,0	Пробитие

Очевидно, проведенные исследования определили выбор материала «сертифицированного» корпуса – титановый сплав OT4-0, толщина стенки 13 мм (с учетом коэффициента надежности, по расчету требуется 10,5 мм). Однако и для этого материала корпус имеет высокую, по сравнению с зарубежными аналогами, массу. Кроме того, разрушение лопатки или ее фрагмента в жестком (непробиваемом) корпусе вызывает разрушение других лопаток за счет рикошета фрагмента от стенки корпуса и, как следствие, выбрасывание их за пределы двигателя.

Оценка энергии поглощения гофрированным пакетом ткани

Другое наиболее приемлемое решение по удержанию оторвавшихся лопаток основано на применении нежестких чехлов, установленных на корпусе вентилятора¹. В патенте РФ 2433281 (рис. 1) чехол 2 для удержания оторвавшихся лопаток выполнен в виде гофрированного пакета (далее – чехол) из слоев ткани волокнистого высокопрочного материала («сухая» ткань). Чехол 2 охватывает корпус 1 по наружной поверхности, закреплен кольцевым жгутом 3 между пористыми резиновыми кольцами 4. Для исключения резания чехла острой

¹ Пат. США 6814541 от 07.10.2002; Пат. РФ 2433281 от 10.11.2011.

кромкой периферийной части лопатки 6 под чехлом установлены тонкие металлические лепестки 5, лепестки соединены между собой заклепками и образуют защитную кольцевую оболочку.

На рис. 1 показано исходное положение лопатки 6, на рис. 2 и 3 – различные стадии движения оторвавшейся лопатки:

I стадия. Частичное поглощение энергии происходит за счет деформации и местного разрушения в процессе пробития лопаткой 6 стенки корпуса 1, изготовленного из металлического или композиционного материала.

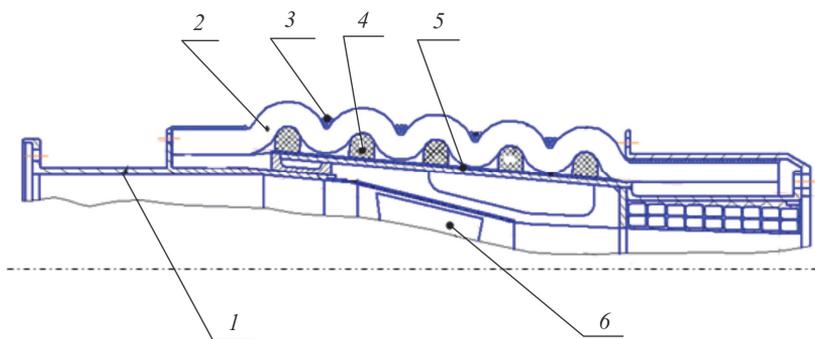


Рис. 1. Конструкция устройства по удержанию оторвавшихся лопаток, выполненная на металлическом корпусе

II стадия. Частичное поглощение энергии за счет деформации металлических лепестков 5 и разрыва легкоразрушаемого соединения лепестков по местам нахлестов. Также происходит распределение энергии удара на наибольшую поверхность гофропакета 2 и уменьшение эффекта резания ее острыми кромками лопатки 6.

III стадия. Частичное поглощение энергии за счет радиального перемещения лепестков 5 совместно с чехлом 2 путем выборки заданного исходного зазора с обжатием легкодеформируемых резиновых колец 4 по периметру корпуса 1 и образованием расчетной по величине местной полости в виде «ловушки» 7.

IV стадия. Частичное поглощение энергии за счет разрыва жгутов 3 и распрямления гофр под натяжением при ударе лопатки, при которых создается дополнительное трение между слоями ткани и волокнами в чехле. При этом увеличивается объем «ловушки» 7, обеспечивающий размещение и фиксацию в ней оторвавшейся лопатки и ее осколков.

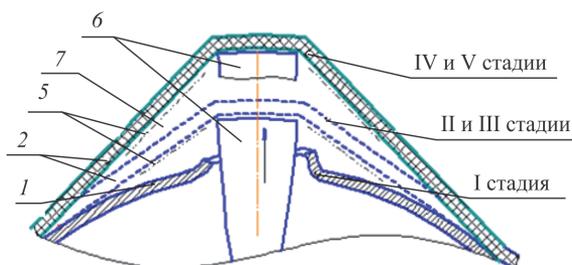


Рис. 2. Схема разрушения корпуса и чехла лопаткой (начальные стадии)

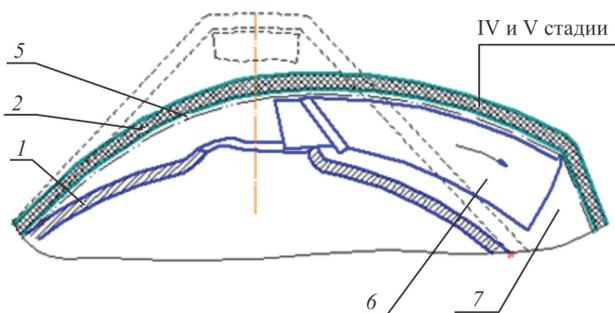


Рис. 3. Схема разрушения корпуса и чехла лопаткой (конечные стадии)

V стадия. Лопатка 6, преодолев сопротивление на стадиях I–IV, продолжает передвигаться в «ловушке» 7 под чехлом в окружном направлении на значительно большем участке пути, чем в радиальном направлении, вплоть до фиксации – «улавливания», поглощая наибольшую часть энергии за счет сопротивления волокон ткани и возникающих сил трения и демпфирования.

На рис. 4 приведена расчетная схема деформирования чехла с опиранием на оболочку корпуса. Работа разрушения чехла, определенная в предположении сохранения жесткости оболочки корпуса после ее локального пробития лопаткой, может быть выражена зависимостью (для конкретизации вопроса приведен пример расчета корпуса диаметром 1940 мм для полной максимальной кинетической энергии оторвавшейся лопатки)

$$A_{\text{гофр}} = 0,5 \cdot Q_{\text{max}} \cdot \Delta R_2 = 270 \text{ кДж}, \quad (8)$$

где $Q_{\text{max}} = 2 \cdot n \cdot Q_{\text{разр}} \cdot \sin \alpha_2 = 5192 \text{ кН}$ – максимальное радиальное усилие торможения лопатки; $n = 74$ – число тканевых слоев в чехле (сум-

марная толщина 20,0 мм); $Q_{\text{разр}} = S \cdot \sigma_B = 55,9$ кН – усилие разрыва тканевого слоя; $S = b \cdot h = 108$ мм² – площадь разрыва тканевого слоя; $b = 400$ мм – ширина лопатки (минимальная линия разрыва тканевого слоя); $h = 0,27$ мм – толщина тканевого слоя; $\sigma_B = 518$ МПа – минимальный предел прочности при разрыве по основе органоткани (арт. 84127)² [7]; $\alpha_2 = 39^\circ$ – угол полураствора не контактирующей с чехлом зоны корпуса перед разрушением чехла (рис. 4); $\Delta R_2 = 104$ мм – путь движения лопатки от момента, когда чехол вытянулся (выбрана слабина, см. рис. 4, т. B), до момента его разрыва (см. рис. 4, т. C).

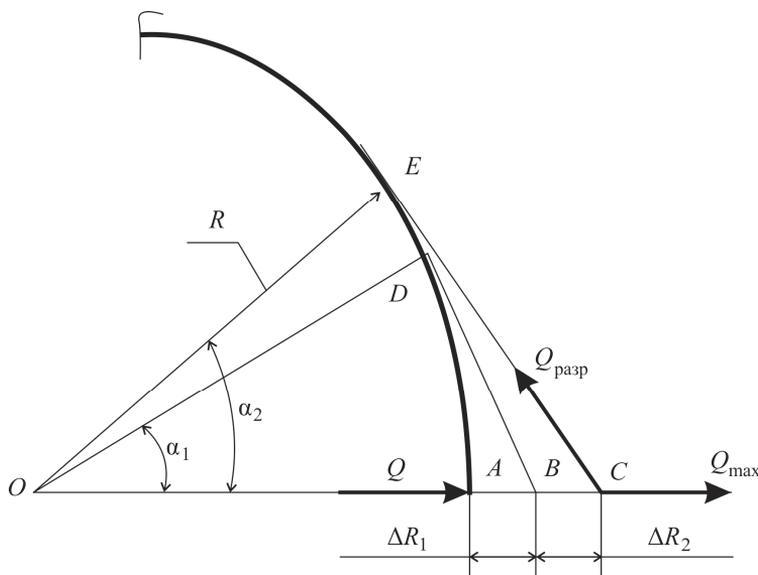


Рис. 4. Расчетная схема деформирования чехла с опиранием на оболочку корпуса

Путь движения лопатки ΔR_2 определен из соотношений (см. рис. 4)

$$\Delta R_2 = R \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha_2} - 1 \right) - \Delta R_1 = 104 \text{ мм},$$

где $R = 970$ мм – расчетный наружный радиус оболочки корпуса; ΔR_1 – путь движения лопатки от момента касания с чехлом (см. рис. 4, т. A) до момента, когда чехол вытянулся (выбрана слабина, см. рис. 4, т. B),

² ТУ 8378-020-00320992–2004. Ткань техническая для производства средств индивидуальной бронезащиты. Технические условия.

$$\Delta R_1 = R \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha_1} - 1 \right) = 174 \text{ мм}; \alpha_1 = 32^\circ - \text{угол полураствора не контактирующей с чехлом зоны корпуса для момента выборки его слабины.}$$

Углы α_1 и α_2 получены из формулы для разности длин периметров поперечного сечения оболочки корпуса $L_{\text{кор}}$ и пакета $L_{\text{пак}}$:

$$L_{\text{пак}i} - L_{\text{кор}} = 2 \cdot (k_i - p_i)$$

или

$$\text{tg } \alpha_i - \alpha_i = \frac{L_{\text{пак}i}}{2 \cdot R} - \pi,$$

где $L_{\text{пак}i}$ – периметр чехла; $L_{\text{пак}1} = \pi \cdot D_{\text{пак}} = 6220$ мм – периметр недеформированного чехла (для расчета α_1); $D_{\text{пак}} = 2 \cdot (R + h_{\text{гофр}}) = 1980$ мм – расчетный внутренний диаметр чехла; $h_{\text{гофр}} = 20$ мм – высота гофр; $L_{\text{пак}2} = \pi \cdot D_{\text{пак}} \cdot (1 + \varepsilon_B) = 6344$ мм – периметр деформированного чехла (для расчета α_2); $\varepsilon_B = 0,02$ – предельная деформация растяжения материала чехла; $L_{\text{кор}} = 2\pi R = 6095$ мм; $k_i = R \cdot \text{tg } \alpha_i$ – длина касательной (см. рис. 4, отрезки BD и CE); $p_i = \alpha_i \cdot R$ – длина дуги (см. рис. 4, дуги AD и AE).

Поскольку при разрыве чехла оболочка корпуса в поперечном сечении будет сжиматься, фактически путь движения лопатки будет больше $\Delta R_2 = 104$ мм, следовательно, работа разрыва чехла будет больше вышеприведенной величины. Кроме того, в представленной методике не учтено поглощение кинетической энергии лопатки материалом чехла [7–10], что способствует увеличению прочности (баллистической стойкости) броневого строения чехла.

О проблеме резания лопатками материала корпуса

Периферийная часть лопатки имеет острые кромки, вызывающие эффект резания материала корпуса и чехла как оторвавшейся лопаткой, так и оставшимися лопатками при контакте с поверхностью корпуса. При этом последнее происходит при пробитии корпуса лопаткой и при натяжении чехла. Работа среза вышеприведенного варианта чехла (см. рис. 4)

$$A_{\text{ср}} = 0,5 \cdot Q_{\text{ср max}} \cdot \Delta R_2 = 59 \text{ кДж}, \quad (9)$$

где $Q_{cp \max} = 2n \cdot Q_{cp} \cdot \sin \alpha_2 = 1128$ кН – максимальное радиальное усилие торможения лопатки; $Q_{cp} = S \cdot \tau_B = 14$ кН – усилие среза тканевого слоя; $S = b \cdot h = 108$ мм² – площадь среза тканевого слоя; $\tau_B = 127$ МПа – предел прочности при срезе тканевого органолокна (ввиду отсутствия паспортных или фактических величин принят как максимальный по характеристикам для композита на основе ткани Т-42-78, согласно работе [10] он не превышает 35 МПа); $\Delta R_2 < 104$ мм – путь движения лопатки от момента, когда чехол вытянулся (выбрана слабина, см. рис. 4, т. В), до момента его среза (см. рис. 4, т. С).

Отсюда видно, что работа деформирования и разрушения конструкции чехла при срезе материала (9) значительно меньше работы разрыва материала (8). Это подтверждается экспериментом, в котором лопатка легко пробилась (за счет среза) органопластиковую стенку толщиной 34 мм корпуса диаметром около 2000 мм (работа гашения по расчету составила около 18 кДж). Толщина стенки вдвое превосходила необходимую расчетную толщину чехла, использованную в соотношении (8).

Следует отметить, что на этом опыте в плоскости, перпендикулярной плоскости движения оторвавшейся лопатки, стенка корпуса была вырезана на дуге 75–80° оставшимися лопатками. Таким образом, расчет и эксперимент выявил проблему, обусловленную «эффектом резания» органопластика лопатками.

Для чехла проблема «резания» решается установкой под чехол металлических лепестков, соединенных между собой заклепками и образующих защитную кольцевую оболочку (см. рис. 1, поз. 5). Эта оболочка обеспечивает большую площадь контакта лопатки с чехлом, при котором исключается его резание. Срез заклепок должен осуществляться при минимальном радиальном усилии, не превышающем минимальное усилие разрушения (среза) оболочки защиты.

Например, усилия разрушения (среза) оболочки защиты из титанового сплава ОТ4:

– при касании лопатки острой кромкой

$$Q_{cp1} = 1,3 \cdot b \cdot h_1 \cdot \tau_B = 436 \text{ кН,}$$

где $b = 400$ мм – ширина лопатки; $h_1 = 2$ мм – толщина лепестка оболочки защиты; $\tau_B = 0,6\sigma_B = 420$ МПа – предел прочности при срезе титанового сплава ОТ4; $\sigma_B = 700$ МПа – предел прочности при растяжении титанового сплава ОТ4 [11];

– при касании лопатки боковой поверхностью (при развороте лопатки)

$$Q_{cp2} = 1,3 \cdot L \cdot h_1 \cdot \tau_B = 1092 \text{ кН},$$

где $L = 1$ м – периметр продольного сечения разрушенной лопатки.

Исходя из вышеприведенных величин усилий разрушения оболочек максимальное количество титановых заклепок, соединяющих каждый лепесток оболочки защиты, должно быть не более

$$n = \frac{Q_{cp1}}{\tau_B \cdot S_{зак}} = 52,$$

где $S_{зак} = 0,785d^2 = 19,6 \text{ мм}^2$ – площадь поперечного сечения заклепки; $d = 5$ мм – диаметр заклепки.

На практике достаточно не более 16 заклепок.

На первом опыте применения защитной оболочки были использованы стальные лепестки толщиной 1 мм, уложенные в окружном направлении внахлест и соединенные заклепками (для титанового сплава ОТ4-0 толщина лепестков должна быть не менее 2 мм). По результатам опыта лепестки практически выполнили свою функцию, были сильно смяты и частично пробиты углом лопатки. В этой зоне чехол также был пробит (прокол) углом лопатки. Полученный результат и материалы исследований [12–14], посвященные проблеме прокола многослойных композиций из высокопрочных тканей в средствах индивидуальной защиты, подтверждают необходимость защиты тканевого чехла от резания и прокола.

Оценка жесткости корпуса

Как сказано выше, работа разрушения чехла определена в предположении сохранения жесткости оболочки корпуса после ее локального пробития лопаткой. Кроме этого «эффект резания» пластиковой оболочки корпуса лопатками также влияет на ее жесткость. Для оценки деформированного состояния оболочки корпуса при натяжении чехла в программном комплексе ANSYS решена задача определения прогиба титановой оболочки корпуса толщиной 13 мм, которая на эксперименте показала достаточную работоспособность. Расчетная схема корпуса приведена на рис. 5.

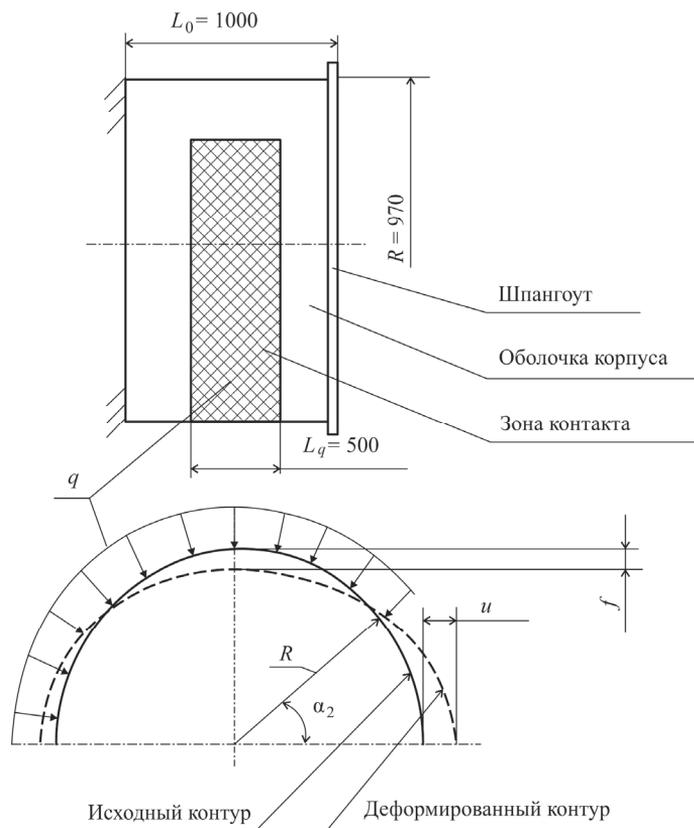


Рис. 5. Оценка деформированного состояния оболочки корпуса при натяжении чехла

Для вышерассмотренной конструкции корпуса усилие разрыва чехла создает контактное давление на корпус

$$q = \frac{n \cdot Q_{\text{разр}}}{R \cdot L_q} = 8,5 \text{ МПа},$$

где $n = 74$ – число тканевых слоев в чехле; $Q_{\text{разр}} = 55,9$ кН – усилие разрыва тканевого слоя (расчет приведен выше); $R = 970$ мм – расчетный наружный радиус корпуса; $L_q = 500$ мм – длина (ширина) чехла.

По результатам расчета максимальный прогиб корпуса в зоне соударения с лопаткой $u = 43$ мм (рис. 5).

В поперечном направлении радиус корпуса уменьшается на $f = 34$ мм.

При таком уровне поперечной деформации оболочка корпуса будет соприкасаться с периферийной частью неразрушенных лопаток и подвергаться резанию их кромками. Если для корпуса из титанового сплава последнее не критично, то для неметаллических композиционных материалов это явление является главной проблемой.

С учетом этой проблемы на первом этапе работ по конструктивному облику корпуса вентилятора в условиях габаритных ограничений была выбрана оболочка корпуса из титанового сплава ОТ4-0 толщиной 4 мм (результаты расчета приводятся в табл. 3, вариант 3). По расчетной оценке результатов испытания пробития лопаткой органопластиковой стенки корпуса толщиной 34 мм толщина стенки из титанового сплава ОТ4-0

$$\delta_{Me} = \delta_{оп} \cdot \frac{\tau_B^{Me}}{\tau_B^{оп}} = 5 \text{ мм},$$

где $\delta_{оп} = 17$ мм – толщина вырезанной части стенки органопластикового корпуса; $\tau_B^{оп} = 127$ МПа – минимальный предел прочности при срезе тканевого органопластика; $\tau_B^{Me} = 420$ МПа – предел прочности при срезе титанового сплава ОТ4-0.

Учитывая работу гашения оболочкой корпуса толщиной 5 мм и оболочкой защиты толщиной 4 мм (два лепестка из пластин толщиной 2 мм), используя соотношение (6), число слоев в чехле ($n = 74$), заданное в соотношении (8), возможно уменьшить на 10–15 % (табл. 3, вариант 4).

О применении углепластика для корпуса вентилятора

Ниже приведен расчет оболочки корпуса из углепластика (УП) с массой, не превышающей массу комбинированного корпуса, без учета габаритных ограничений с целью оценки перспективы применения неметаллических композиционных материалов. Состав стенки корпуса вентилятора (рис. 6, см. табл. 3, вариант 6):

- нулевой, притираемый по лопаткам слой – оболочка из алюминиевых сот с наполнителем;
- первый, третий и пятый слой – УП-оболочки толщиной 4 мм;
- второй и четвертый слой – УП-заполнитель в виде полых труб;

- шестой слой – защитная (от резания чехла) оболочка из двух слоев пластин толщиной 2 мм из сплава ОТ4-0, заклепанных между собой;
- седьмой слой – чехол из 72 слоев органоткани (арт. 84127).

Таблица 3

Конструктивные варианты корпуса вентилятора, обеспечивающие непобитие стенки корпуса оторвавшейся лопаткой

Вариант корпуса	Структура стенки						Энергия поглощения, кДж
	Номер слоя	Назначение и материал слоя	Физико-механические характеристики			Толщина слоя (пакета), мм	
			σ_B , МПа	τ_B , МПа	ϵ_B , %		
1	1	Силовой, сплав ВТ6	950	–	6	15,5	270,0
2	1	Силовой, сплав ОТ4-0	700	–	15	10,3	270,0
3	1	Силовой, сплав ОТ4-0	700	–	15	4,0	69,8
	2	Защитный, сплав ОТ4-0	–	420	–	2,0 + 2,0	3,4×2
	3	Уловитель лопатки, органоткань	518	–	–	14,3	193,4
	$\Sigma 22,3$						$\Sigma 270,0$
4	1	Силовой, сплав ОТ4-0	700	–	15	5,0	97,5
	2	Защитный, сплав ОТ4-0	–	420	–	2,0 + 2,0	3,4×2
	3	Уловитель лопатки, органоткань	518	–	–	12,2	165,7
	$\Sigma 21,2$						$\Sigma 270,0$
5	1,5	Силовой, углепластик	–	91	–	2,0	0,15×2
	2,4	Заполнитель трубчатый	–	–	–	23,0	0
	3	Силовой, углепластик	–	91	–	8,0	0,6
	6	Защитный, сплав ОТ4-0	–	420	–	2,0 + 2,0	3,4×2
	7	Уловитель лопатки, органоткань	518	–	–	19,4	262,3
	$\Sigma 81,4$						$\Sigma 270,0$
6	1,3,5	Силовой, углепластик	–	91	–	4,0	0,3×3
	2,4	Заполнитель трубчатый	–	–	–	23,0	0
	6	Защитный, сплав ОТ4-0	–	420	–	2,0 + 2,0	3,4×2
	7	Уловитель лопатки, органоткань	518	–	–	19,4	262,3
	$\Sigma 81,4$						$\Sigma 270,0$
7	1	Силовой, сплав АК4-1	380	–	9	21,7	270,0

Суммарная толщина пятислойной УП-стенки составляет 58 мм. Увеличение строительной высоты стенки корпуса необходимо для создания высокой жесткости корпуса, при которой снижается «эффект резания» УП-оболочек.

Максимальное усилие разрушения (среза) УП-оболочек

$$Q_{\text{срз}} = S_1 \cdot \tau_B = 146 \text{ кН},$$

где $S_1 = b \cdot h_1 = 1600 \text{ мм}^2$ – площадь среза; $b = 400 \text{ мм}$ – ширина лопатки; $h_1 = 4 \text{ мм}$ – толщина оболочки; $\tau_B = 91 \text{ МПа}$ – минимальный предел прочности при срезе материала УП на основе углеродной ткани УТ-900 и связующего СФ-010 [15].

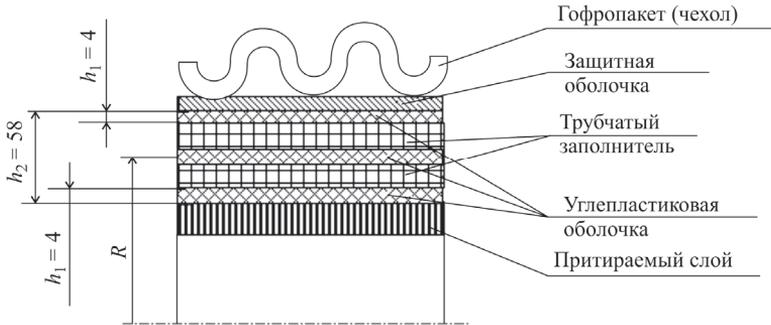


Рис. 6. Состав стенки корпуса из углепластика

Трубчатый наполнитель практически не представляет какой-либо преграды для пробития лопаткой, поэтому в расчете не учитывается.

Энергия разрушения пятислойного участка корпуса

$$W_1 = n_1 \cdot A_1 = 0,9 \text{ кДж},$$

где $n_1 = 3$ – количество УП оболочек; $A_1 = 0,5 \cdot Q_{\text{срз}} \cdot h_1 = 0,3 \text{ кДж}$ – работа среза оболочки толщиной 4 мм.

Отсюда видно, что для УП-корпуса основная доля в гашении кинетической энергии лопатки должна отводиться чехлу. Вследствие последовательного разрушения УП-оболочек максимальное радиальное усилие, вызывающее деформирование корпуса до момента натяжения чехла, составляет не более 146 кН.

Локальное разрушение стенки корпуса от лопатки (40 % по длине и 2 % по площади) не приводит к заметному снижению жесткости корпуса как единой конструкции. Максимальная радиальная деформация (прогиб) корпуса в зоне соударения с лопаткой [5]

$$\Delta R_3 = \frac{Q_{\text{срз}}}{\pi \cdot E_2 \cdot h_2} \cdot \left[\frac{L_1^3}{6 \cdot R^3} + 1,7 \cdot \sqrt{\frac{R^3}{h_2^3}} \right] = 2 \text{ мм},$$

где $E_2 = 65$ ГПа – средний модуль упругости в окружном направлении пятислойной стенки из УП-оболочек; $h_2 = 58$ мм – толщина стенки; $L_1 = 300$ мм – длина пятислойного участка корпуса; $R = 950$ мм – средний радиус пятислойного участка корпуса.

В направлении, перпендикулярном направлению движения лопатки, радиус корпуса уменьшается на

$$\Delta R_4 = k_1 \cdot \Delta R_3 = 1,6 \text{ мм},$$

где k_1 – коэффициент прогиба для поперечного направления, равный 0,8, что соизмеримо с зазором между внутренней поверхностью корпуса и торцами периферийной части лопаток, следовательно, для рассмотренной структуры стенки исключается резание УП-оболочек лопатками в момент пробития корпуса оторвавшейся лопаткой.

При натяжении чехла возникает очередной прогиб стенки, более значительный по сравнению с вышеприведенным. Расчетная оценка УП-структуры стенки в этом расчетном случае затруднена. Применение пятислойной структуры стенки УП-корпуса оправдано в этом случае тем, что при разрушении первого силового слоя сохраняется трехслойная структура, обеспечивающая высокую жесткость стенки по сравнению с однослойной стенкой.

По результатам исследований в табл. 3 приведены сравнительные показатели расчета нескольких вариантов толщин стенок корпуса для кинетической энергии оторвавшейся лопатки 270 кДж. Для каждого слоя стенки корпуса приведены физико-механические характеристики материала и толщина, использованные для расчета энергии поглощения слоем. Следует отметить, что соотношение (7) применимо для любых пластичных металлов. Так, в табл. 3 (вариант 7) приведены результаты расчета толщины стенки корпуса из высокопрочного алюминиевого сплава АК4-1, которая превышает толщины стенки из титановых сплавов (варианты 1, 2), что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работе [4].

О перспективе применения тканевых структур для чехла

Экспериментальная отработка чехла проводилась с использованием арамидной ткани (арт. 84127)³. Согласно работам [8, 9] арамидные ткани эффективны при скоростях ударного воздействия 270–320 м/с, со-

³ ТУ 8378-020-00320992–2004. Ткань техническая для производства средств индивидуальной бронезащиты. Технические условия.

ответствующих скоростям движения оторвавшихся лопаток вентилятора. Таким образом, выбор материала гофрированного тканого пакета в конструкции вентилятора выполнен правильно.

В настоящее время ведутся исследования по разработке рациональных тканевых структур с высокой энергией поглощения [16]. Применение таких структур позволит увеличить баллистическую стойкость чехла.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методика и проведены расчеты металлической стенки на пробитие с учетом прочности и предельной деформации материала стенки. Методика расчета металлической стенки на пробитие согласно нормам прочности авиационных двигателей не учитывает пластичность материала.

2. Описано и показано устройство для удержания оторвавшихся лопаток вентилятора авиационного двигателя, выполненное в виде гофрированного пакета (или чехла) из высокопрочной органоткани. Чехол может быть установлен как на металлический, так и на пластиковый корпус вентилятора. Представлена методика расчета данного устройства.

3. При работе тканевого пакета (чехла) на растяжение устройство для удержания оторвавшихся лопаток способно гасить до 90 % кинетической энергии удара, тогда как при работе на срез тканевый пакет способен гасить не более 20 % кинетической энергии удара. Исключение среза тканевого пакета острыми кромками фрагментов лопаток обеспечивается с помощью специальной конструкции защитной оболочки, установленной между корпусом и тканевым пакетом.

4. Эффективность работы тканевого пакета зависит от жесткости и целостности корпуса, который в момент деформирования пакета подвержен резанию острыми кромками лопаток вследствие собственного деформирования от контактного взаимодействия с тканевым пакетом:

– для корпуса диаметром 2000 мм из титанового сплава ОТ4-0 необходимая расчетная толщина стенки составляет от 4 до 5 мм;

– для углепластикового корпуса жесткость и целостность может быть обеспечена увеличением (на порядок) строительной высоты стенки и оптимизацией ее структуры (например, применением пятислойной структуры).

Библиографический список

1. Нормы прочности авиационных двигателей. – 6-е изд. / Центр ин-т авиац. машиностроения. – М., 2005.
2. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / В.А. Григорян, И.Ф. Кобылкин, В.М. Маринин, Е.Н. Чистяков. – М.: РадиоСофт, 2008. – 406 с.
3. Ефимов М.Г. Курс артиллерийских снарядов. – М.: Оборонгиз, 1939. – 320 с.
4. Перспективы применения в средствах индивидуальной бронезащиты высокопрочных алюминиевых сплавов / Д.Г. Купрюнин, Э.Н. Петрова, С.Ю. Чусов, В.П. Яньков // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2013. – Вып. 3(170)–4(171). – С. 51–55.
5. Лизин В.Т., Пяткин В.А. Проектирование тонкостенных конструкций. – М.: Машиностроение, 1994. – 384 с.
6. Металлические конструкции. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений. Справочник проектировщика / под общ. ред. В.В. Кузнецова. – М.: АСВ, 1998. – 512 с.
7. Ермоленко А.Ф., Будадин О.Н., Харченко Е.Ф. Тепловой метод исследования энергопоглощающей способности композитных броневых преград // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2010. – Вып. 3 (158). – С. 23–27.
8. Харченко Е.Ф., Ермоленко А.Ф. Изменение энергопоглощения текстильных бронематериалов в зависимости от скорости поражающих элементов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2010. – Вып. 1(156)–2(157). – С. 39–42.
9. Ермоленко А.Ф. Модель послойного пробития тканевых и композитных броневых преград // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2012. – Вып. 1(164)–2(165). – С. 18–23.
10. Харченко Е.Ф., Зайцева Л.В., Николаева О.В. Влияние модификации эпоксидных связующих на защитные характеристики арамидных композитов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2011. – Вып. 1(160)–2(161). – С. 26–29.
11. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 704 с.
12. Харченко Е.Ф., Заикин С.В. Материалы на основе арамидных волокон для защиты от холодного оружия // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2000. – Вып. 1(122). – С. 28–29.

13. Харченко Е.Ф., Заикин С.В. Исследование эффективности гибридных композитов для защиты от холодного оружия // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 1999. – Вып. 1(120)–2(121). – С. 46–47.

14. Ермоленко А.Ф., Соловьева Е.А. Математическая модель сопротивления проколу мягких защитных материалов // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2012. – Вып. 1(164)–2(165). – С. 28–32.

15. Исследование свойств композиционных материалов на основе углеродных тканых наполнителей / А.А. Кульков [и др.] // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2010. – Вып. 1(156)–2(157). – С. 11–16.

16. Разработка рациональных структур мягкой баллистической защиты на основе арамидных нитей Руслан / П.Е. Сафонов, Н.М. Левакова, С.С. Юхин, М.Е. Буланова // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2013. – Вып. 3(170)–4(171). – С. 27–33.

References

1. Normy prochnosti aviatsionnykh dvigateley [Aircraft engines' strength standards]. Moscow: Tsentralnyy institut aviatsionnogo mashinostroeniya, 2005.

2. Grigoryan V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistyakov E.N. Materialy i zashchitnye struktury dlya lokalnogo i individualnogo bronirovaniya [Materials and protecting structures for local and individual armoring]. Moscow: RadioSoft, 2008. 406 p.

3. Efimov M.G. Kurs artilleriyskikh snaryadov [Course of artillery shells]. Moscow: Oborongiz, 1939. 320 p.

4. Kupryunin D.G., Petrova E.N., Chusov S.Yu., Yankov V.P. Perspektivy primeneniya v sredstvakh individualnoy bronezashchity vysokoprochnykh alyuminievykh splavov [Prospects in application of individual high-strength aluminum alloys armory]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2013, iss. 3(170)-4(171), pp. 51-55.

5. Lizin V.T., Pyatkin V.A. Proektirovanie tonkostennykh konstruktsiy [Design of thin wall structures]. Moscow: Mashinostroenie, 1994. 384 p.

6. Metallicheskie konstruktsii. Tom 2. Stalnye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy. Spravochnik proektirovshchika [Metal structures. Volume 2. Steel structures of buildings and constructions. Designer's reference book]. Ed. V.V. Kuznetsov. Moscow: ASV, 1998. 512 p.

7. Yermolenko A.F., Budadin O.N., Kharchenko E.F. Teplovoy metod issledovaniya energopogloshchayushchey sposobnosti kompozitnykh

bronevykh pregrad [Thermal analysis of energyabsorbing capability of composite armory]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2010, iss. 3(158), pp. 23-27.

8. Kharchenko E.F., Yermolenko A.F. Izmenenie energopogloshcheniya tekstilnykh bronematerialov v zavisimosti ot skorosti porazhayushchikh elementov [Energyabsorbing changes in textile armory materials depending on velocity of damaging factors]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2010, iss. 1(156)-2(157), pp. 39-42.

9. Yermolenko A.F. Model posloynogo probitiya tkanevykh i kompozitnykh bronevykh pregrad [Model of layer-by-layer damage of textile and composite armoring barriers]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2012, iss. 1(164)-2(165), pp. 18-23.

10. Kharchenko E.F., Zaitseva L.V., Nikolayeva O.V. [Influence of various epoxy binders upon shielding properties of aramid composites]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2011, iss. 1(160)-2(161), pp. 26-29.

11. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Strength of materials guide]. Kiev: Naukova dumka, 1975. 704 p.

12. Kharchenko E.F., Zaikin S.V. Materialy na osnove aramidnykh volokon dlya zashchity ot kholodnogo oruzhiya [Materials based on aramid fibers for cold arms protection]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2000, iss. 1(122), pp. 28-29.

13. Kharchenko E.F., Zaikin S.V. Issledovanie effektivnosti gibridnykh kompozitov dlya zashchity ot kholodnogo oruzhiya [Analysis of hybrid composites efficiency for cold arms protection]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 1999, iss. 1(120)-2(121), pp. 46-47.

14. Yermolenko A.F., Soloviyova E.A. Matematicheskaya model soprotivleniya prokolu myagkikh zashchitnykh materialov [Mathematical model of resistance to puncture of soft protecting materials]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2012, iss. 1(164)-2(165), pp. 28-32.

15. Kulkov A.A. [et al.]. Issledovanie svoystv kompozitsionnykh materialov na osnove uglerodnykh tkanykh napolniteley [Properties analysis of composite materials based on carbon cloth fillers]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2010, iss. 1(156)-2(157), pp. 11-16.

16. Safonov P.E., Levakova N.M., Yukhin S.S., Bulanova M.E. Razrabotka ratsionalnykh struktur myagkoy ballisticheskoy zashchity na osnove aramidnykh nitey Ruslan [Development of rational structures of soft ballistic armory made of Ruslan aramid fibers]. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Seriya 15*, 2013, iss. 3(170)-4(171), pp. 27-33.

Об авторах

Куртеев Владимир Аркадьевич (Пермь, Россия) – ведущий конструктор ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденева, д. 28, e-mail: pioneer241@mail.ru).

Мозеров Борис Георгиевич (Пермь, Россия) – главный конструктор проекта ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденева, д. 28, e-mail: pioneer241@mail.ru).

Соколовский Михаил Иванович (Пермь, Россия) – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, генеральный конструктор ПАО НПО «Искра» (614038, г. Пермь, ул. Академика Веденева, д. 28).

Иноземцев Александр Александрович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, управляющий директор – генеральный конструктор ОАО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93).

About the authors

Vladimir A. Kurteev (Perm, Russian Federation) – Leading Designer of PJSC “Research and Production Association ISKRA” (28, Akademika Vedeneva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: pioneer241@mail.ru).

Boris G. Mozerov (Perm, Russian Federation) – Project Designer of PJSC “Research and Production Association ISKRA” (28, Akademika Vedeneva st., Perm, 614038, Russian Federation, e-mail: pioneer241@mail.ru).

Mikhail I. Sokolovskiy (Perm, Russian Federation) – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Designer of PJSC “Research and Production Association ISKRA” (28, Akademika Vedeneva st., Perm, 614038, Russian Federation).

Aleksandr A. Inozemtsev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Managing Director – General Designer of OJSC “Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Получено 16.01.2015