

УДК 629.734.7

doi: 10.32620/aktt.2019.4.12

П. А. ФОМИЧЕВ¹, И. М. СИЛА²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина*² *Государственный научно-исследовательский институт испытаний и сертификации вооружения и военной техники, Чернигов, Украина*

ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРУШАЮЩИХ НАГРУЗОК ЭЛЕМЕНТОВ КАРКАСА КУПОЛА ПАРАШЮТА

Известно, что в процессе эксплуатации или длительного хранения происходит существенное ухудшение (деградация) прочностных характеристик силовых элементов каркаса купола парашюта, включая стропы, ткань купола, усилительные тесьмы, свободные концы подвесной системы, ножные обхваты и др.

Парашюты проектируют с учетом конкретных коэффициентов запаса прочности силовых элементов на восприятие экстремальных нагрузок в момент раскрытия. Дальнейшая эксплуатация сверх установленного срока при сохранении неизменными коэффициентов запаса прочности возможна только при ограничении полетных условий, в частности, скоростей десантирования. Прочностным характеристикам свойственно значительное рассеяние. Проектирование парашютов проводят с учетом гарантированных значений разрушающих нагрузок элементов с заданным уровнем надежности. При этом должен быть известен закон распределения разрушающих нагрузок.

Проведена проверка применимости нормального распределения прочностных характеристик с использованием составного критерия согласия. За основу приняты данные прочностных испытаний до разрушения образцов из строп и ткани купола по основе и по утку. Образцы были вырезаны из десантного парашюта Д-5 серии 2 1983 года выпуска, запасного парашюта З-5 1984 года выпуска, спасательного парашюта С-5К серии 2 1989 года выпуска. В общей сложности испытан 301 образец из различных материалов указанных парашютов. На первом этапе обработки данных испытаний по экспериментальному определению разрушающей нагрузки проведена отбраковка грубых выбросов, далее применен составной критерий соответствия нормальному закону.

По итогам сопоставления с экспериментальными данными однозначно показана справедливость нормального закона распределения разрушающих нагрузок для строп и тканей куполов как по основе, так и по утку.

Полученный результат дает возможность оценивать прочностные характеристики элементов каркаса после эксплуатации или длительного хранения с требуемым уровнем надежности и, в дальнейшем, находить коэффициенты деградации прочности силовых элементов. Эти коэффициенты будут ограничивать максимально допустимую скорость десантирования с конкретным парашютом.

Ключевые слова: *прочность; разрушающая нагрузка; вероятность; закон распределения; коэффициент деградации.*

Введение

В процессе эксплуатации или длительного хранения парашютов происходит деградация (снижение) прочностных характеристик строп, ткани купола, усилительных лент и др. [1]. Для сохранения коэффициентов запаса прочности, принятых при проектировании парашюта необходимо ограничение полетных условий применения парашютов, в частности, скоростей десантирования. В статье [2] предложена зависимость максимально допустимых

нагрузок на парашют в зависимости от коэффициентов деградации, а в [3] рассмотрены ограничения по максимальным скоростям десантирования с учетом деградации прочностных характеристик материалов купола парашюта. Действительные значения этих коэффициентов зависят от типа материала и парашюта, сроков хранения или эксплуатации, условий применения и должны быть определены путем испытаний до разрушения элементов каркаса.

Прочностные характеристики имеют статистический характер. При проектировании парашютов

используют допускаемые разрушающие нагрузки, соответствующие минимальным в испытаниях с заданным уровнем надежности. Для установления таких нагрузок после длительной эксплуатации или хранения должен быть известен закон распределения разрушающих нагрузок. Наиболее часто используют нормальное распределение. В случае применения критериев согласия χ^2 или ω^2 необходимо большое число результатов измерений, в данном случае испытаний образцов до разрушения. Это весьма затруднительно, поскольку реальные размеры купола и размеры, требуемые для образцов, ограничивают их число. Предпочтительным является применение критериев соответствия результатов испытаний нормальному распределению при ограниченном числе результатов наблюдений [4].

Цель данной статьи заключается в проверке соответствия результатов разрушающих испытаний элементов каркаса купола парашюта нормальному закону распределения.

Методика проверки соответствия результатов разрушающих испытаний нормальному закону распределения

За основу принят подход, изложенный в [4]. Последовательно рассмотрим разделы, относящиеся к задаче обработки результатов прочностных испытаний

Среднее арифметическое результатов испытаний однотипных элементов каркаса парашюта до разрушения составляет

$$P_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

где n – число испытанных образцов (объем выборки),

P_i – разрушающая нагрузка i -го образца.

Оценка среднего квадратичного отклонения результатов испытаний равна

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2}. \quad (2)$$

Для исключения грубых погрешностей использован критерий Граббса. Для этого вычислены критерии G_1 и G_2 в предположении, что наибольшее и наименьшее значения экспериментально полученных нагрузок вызвано грубыми погрешностями (выбросами)

$$G_1 = \frac{|P_{max} - P_{cp}|}{S}, \quad G_2 = \frac{|P_{min} - P_{cp}|}{S}, \quad (3)$$

где P_{max} и P_{min} – максимальное и минимальное значения разрушающих нагрузок в выборке.

Значения G_1 и G_2 необходимо сравнить с теоретическим значением критерия Граббса G_T при выбранном уровне значимости, заданном таблично.

Если G_1 или G_2 больше G_T , соответствующие P_{max} или P_{min} исключают из совокупности измерений как маловероятные. По исправленным результатам измерений вновь вычисляют среднее арифметическое и среднее квадратичное отклонение результатов испытаний и повторяют процедуру проверки наличия грубых погрешностей. В противном случае указанные нагрузки следует сохранить в ряду результатов испытаний.

Если $G_1 < G_T$ или $G_2 \leq G_T$, соответствующие значения P_{max} или P_{min} сохраняют в ряду результатов измерений.

После отбраковки грубых выбросов при числе измерений n проверку соответствия нормальному закону проводят с использованием составного критерия.

Критерий 1.

Вычисляют отношение \bar{d}

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - P_{cp}|}{nS^*}, \quad (4)$$

где S^* – смещенная оценка среднего квадратичного отклонения, вычисленная по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{cp})^2}{n}}. \quad (5)$$

Результаты испытаний можно считать распределенными нормально, если выполнено условие

$$d_{1-q/2} < \bar{d} \leq d_{q/2}, \quad (6)$$

где $d_{1-q/2}$ и $d_{q/2}$ таблично заданные квантили распределения для заранее выбранного уровня значимости критерия q .

Критерий 2.

Подсчитывают число разностей $|P_i - P_{cp}|$, превышающих значение $Z_{Q/2} S$, где S – оценка среднего квадратичного отклонения результатов испытаний, $Z_{Q/2}$ – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, соответствующий вероятности $Q/2$. Это число обозначают как j . Считают, что результаты испытаний принадлежат нормальному распределению, если

$$j \leq m. \quad (7)$$

Допустимое число разностей m , приведенное в соответствующей таблице [4], зависит от количества испытанных образцов и вероятности Q . Значение вероятности Q следует принимать по выбран-

ному уровню значимости и числу результатов испытаний.

В случае, когда хотя бы один из отмеченных двух критериев не выполнен, считают, что результаты прочностных испытаний не соответствуют нормальному распределению разрушающих нагрузок.

Результаты прочностных испытаний силовых элементов каркаса парашютов

Проведены испытания до разрушения строп, ткани купола парашюта по основе и утку десантного парашюта Д-5 серии 2 1983 года выпуска, запасного парашюта 3-5 1984 года, спасательного парашюта С-5К серии 2 1989 года выпуска. Испытания образцов проведены научными сотрудниками лаборатории «Прочность» ХАИ Е. Ф. Кучерявым и К. В. Мироновым. Лаборатории «Прочность» ХАИ Авиационными властями Украины делегировано право на проведение сертификационных экспертиз прочности сверхлегких и легких летательных аппаратов.

Испытано в сумме 54 образца из строп парашюта Д-5 серии 2 (по 6 образцов каждой стропы), которые были выбраны по всему периметру купола с одинаковым шагом. Образцы вырезали у кромки купола, в середине стропы, в конце стропы у дуговой пряжки. Аналогично испытано 48 образцов из строп парашюта 3-5 и 48 образцов из строп парашюта С-5К серии 2. Стropy изготовлены из шнура капронового с противожигаемой пропиткой. Парашюты Д-5 и 3-5 имеют стропы из ШКП-150 с разрывной нагрузкой в исходном состоянии не менее 150 кгс, спасательный парашют С-5К – из ШКП-200 с разрывной нагрузкой не менее 200 кгс.

Разрывная нагрузка стандартного образца шириной 50 мм из ткани купола парашюта Д-5 серии 2 56009П по основе составляет не менее 50 кгс, по утку 48 кгс.

Ткань купола парашюта 3-5 56011АП имеет разрывную нагрузку стандартного образца шириной 50 мм не менее по основе 29 кгс, по утку 28 кгс, ткань 56011П имеет разрывную нагрузку не менее 25 кгс и 22 кгс, соответственно.

Купол парашюта С-5К серии 2 изготовлен из капроновых тканей 56002П и 56002КрП с разрывной нагрузкой стандартного образца не менее 43 кгс по основе и по утку. Вдоль кромки купола в месте крепления строп использована капроновая каландрированная ткань 56011АП с разрывной нагрузкой не менее 29 кгс по основе и 28 кгс по утку. Образцы из тканей куполов вырезали из полотнищ в радиальном направлении от вершины до кромки купола.

Для каждого полотнища испытано в среднем по 5 образцов по основе и 5 по утку.

В качестве примера на рисунке 1 представлено сопоставление эмпирической гистограммы распределения разрушающей нагрузки для строп парашюта Д-5 серии 2 и плотности нормального распределения. Можно отметить их непротиворечивость. Количественная оценка соответствия нормальному закону распределения проведена согласно [4].

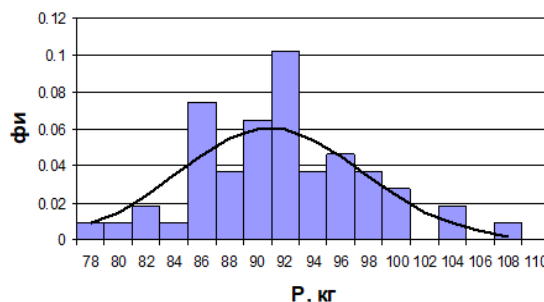


Рис. 1. Эмпирическая гистограмма распределения разрушающей нагрузки для строп парашюта Д-5 серии 2

Результаты испытаний строп и ткани купола для каждого типа парашютов представлены на рисунках 2 – 4.

Обработка данных прочностных испытаний

Результаты проверки соответствия данных прочностных испытаний нормальному распределению для каждого из парашютов представлены в таблицах 1 – 3. На этапе отбраковки грубых выбросов значения G_1 и G_2 вычислены по формулам (3), теоретическое значение критерия Граббса G_T принято по таблице в [4]. Средняя величина разрушающей нагрузки и оценка среднего квадратичного отклонения определены по формулам (1), (2). Проверка соответствия нормальному распределению выполнена с использованием составного критерия, формулы (4) – (7).

В таблице 3 приведены данные для основных капроновых тканей купола 56002П и 56002КрП без учета каландрированных полотнищ из ткани 56011АП.

Соответствие нормальному распределению показано, поскольку одновременно выполнены условия

$$d_{q/2} \geq \bar{d} > d_{1-q/2} \text{ и } j \leq m.$$

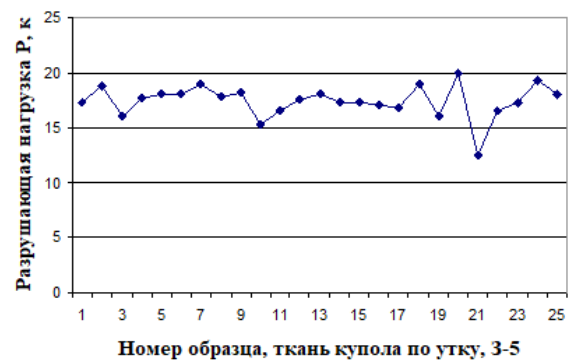


Рис. 2. Результаты испытаний образцов из парашюта Д-5 серии 2

Рис. 3. Результаты испытаний образцов из парашюта 3-5

Таблица 1

Критерии соответствия нормальному распределению разрушающих нагрузок для силовых элементов каркаса парашюта Д-5 серии 2

Силовой элемент	n	G ₁	G ₂	G _T	P _{ср.} кгс	S	d _{q/2}	\bar{d}	d _{1-q/2}	m	J
Стропы	4	2,868	2,220	3,381	91,96	6,289	0,865	0,773	0,729	2	1
Ткань купола по основе	5	2,131	2,449	3,301	30,58	2,074	0,877	0,806	0,717	2	0
Ткань купола по утку	9	1,889	1,950	3,218	32,11	3,646	0,883	0,844	0,711	2	0

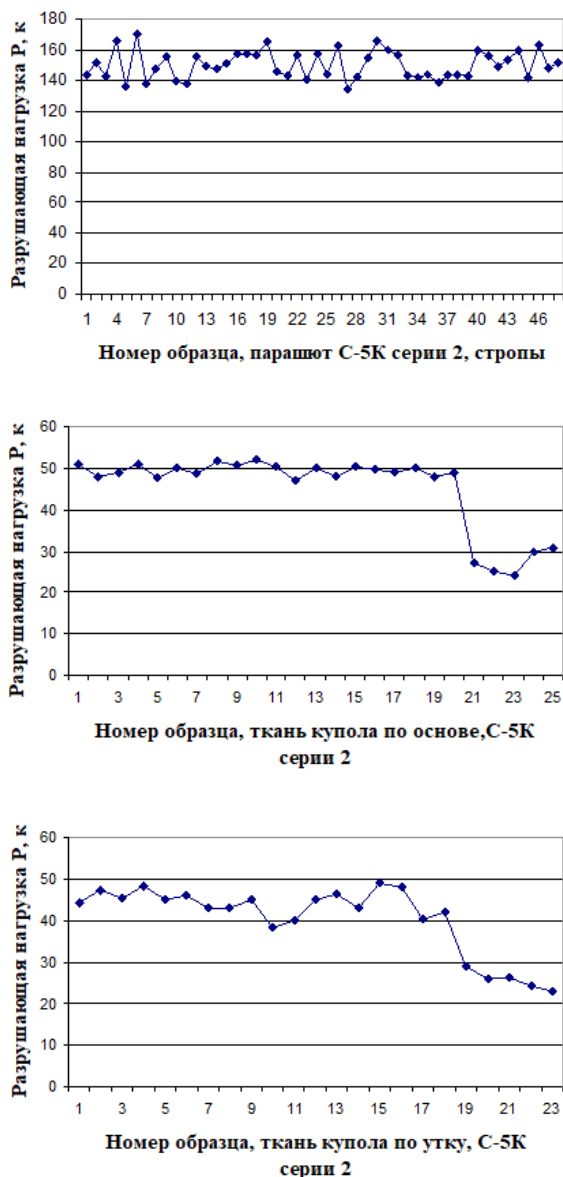


Рис. 4. Результаты испытаний образцов из парашюта С-5К серии 2

Выводы

1. В общей сложности проведены испытания 301 образца из строп и тканей куполов. Только для одного образца из ткани купола парашюта 3-5 по утку получены результаты, которые могут быть отнесены к грубым выбросам. Это свидетельствует о стабильности методики испытаний и качестве разработанных приспособлений для испытаний.

2. Для всех исследованных материалов совместно выполняются условия (7) и (8) составного критерия согласия, из чего следует справедливость нормального закона распределения разрушающих нагрузок для строп и ткани купола как по основе, так и по утку.

3. Зависимость прочности образцов из строп трех парашютов от их расположения по длине стропы не установлена.

4. Зависимость прочности образцов из ткани купола как по утку, так и по основе от их расположения по полотнищам в радиальном направлении не установлена.

5. В наибольшей мере деградация прочности силовых элементов каркаса имеет место для парашюта Д-5 серии 2, менее для 3-5.

6. Для спасательного парашюта С-5К серии 2, который ни разу не был введен в действие, отмечена деградация прочности строп и в меньшей мере каландрированной части купола. Деградация прочности основной части купола отсутствует.

Литература

1. Лобанов, Н. А. Основы расчета и конструирования парашютов [Текст] / Н. А. Лобанов. – М. : Машиностроение, 1965. – 363 с.
 2. Фомичев, П. А. Установление ограничений по максимальным скоростям десантирования с учетом деградации прочностных характеристик материалов купола парашюта. Сообщение 1. Зависимость прочности парашютов от деградации прочностных характеристик конструкционных материалов [Текст] / П. А. Фомичев // *Авиационно – космическая техника и технология*. – 2019. – №1 (153). – С. 65-71. DOI: 10.32620/akt.2019.1.08.

Таблица 2

Критерии соответствия нормальному распределению разрушающих нагрузок для силовых элементов каркаса парашюта 3-5

Силовой элемент	n	G ₁	G ₂	G _T	P _{ср} , кгс	S	d _{q/2}	\bar{d}	d _{1-q/2}	m	J
Стропы	8	2,144	2,620	3,381	96,11	4,24	0,865	0,756	0,729	2	1
Ткань купола по основе	5	1,787	2,032	3,135	20,08	1,912	0,890	0,85	0,704	2	0
Ткань купола по утку	4	2,134	2,052	3,112	17,6	1,123	0,890	0,792	0,704	2	0

Таблица 3

Критерии соответствия нормальному распределению разрушающих нагрузок для силовых элементов каркаса парашюта С-5К серии 2

Силовой элемент	n	G ₁	G ₂	G _T	P _{ср} , кгс	S	d _{q/2}	\bar{d}	d _{1-q/2}	m	j
Стропы	8	2,190	1,764	3,381	150,06	9,106	0,867	0,867	0,727	2	0
Ткань купола по основе	0	1,814	1,807	3,001	49,49	1,381	0,9	0,851	0,695	1	0
Ткань купола по утку	8	1,521	2,006	2,932	44,47	2,978	0,907	0,818	0,689	1	0

3. Фомичев, П. А. Установление ограничений по максимальным скоростям десантирования с учетом деградации прочностных характеристик материалов купола парашюта. Сообщение 2. Зависимость максимальных скоростей десантирования от деградации прочности [Текст] / П. А. Фомичев // *Авиационно – космическая техника и технология*. - 2019. – № 2 (154). – С. 61-68. DOI: 10.32620/akt.2019.2.08.

4. ГОСТ Р 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2013. – 20 с.

References

1. Lobanov, N. A. *Osnovu rascheta y`konstruy`rovany`ya parashyutov* [The basics of calculating and designing parachutes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 363 p.

2. Fomy`chev, P. A. Ustanovleny`e ograny`cheny`j po maksy`mal`num skorostyam desanty`rovany`ya s uchetom degradacy`y` prochnostnux karaktery`sty`k matery`alov kupola parashyuta. Soobshheny`e 1. Zavy`sy`most` prochnosty` parashyutov ot degradacy`y`

prochnostnux karaktery`sty`k konstrukcy`onnux matery`alov [Setting limits on maximum landing speeds, taking into account the degradation of the strength characteristics of the materials of the parachute dome. Message 1. The dependence of parachute strength on the degradation of the strength characteristics of structural materials]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 1 (153), pp. 65-71. DOI: 10.32620/akt.2019.1.08.

3. Fomy`chev, P. A. Ustanovleny`e ograny`cheny`j po maksy`mal`num skorostyam desanty`rovany`ya s uchetom degradacy`y` prochnostnux karaktery`sty`k matery`alov kupola parashyuta. Soobshheny`e 2. Zavy`sy`most` maksy`mal`nux skorostej` desanty`rovany`ya ot degradacy`y` prochnosty` [Setting limits on maximum landing speeds, taking into account the degradation of the strength characteristics of the materials of the parachute dome. Message 2. Dependence of maximum landing speeds on the degradation of strength]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 2 (154), pp. 61-68. DOI: 10.32620/akt.2019.2.08.

4. *State Standard 8.736-2011. The measurements are direct multiples. How measurements are processed*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 20 p. (In Russian)

Поступила в редакцию 31.05.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

ЗАКОН РОЗПОДІЛУ РУЙНІВНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ЕЛЕМЕНТІВ КАРКАСУ КУПОЛА ПАРАШЮТА

П. О. Фомичов, І. М. Сила

Відомо, що в процесі експлуатації або тривалого зберігання відбувається суттєве погіршення (деградація) міцності силових елементів каркасу купола парашюта, включаючи стропа, тканину купола, підсилювальні стрічки, вільні кінці підвісної системи, ножні обхвати та ін.

Парашути проектують з урахуванням конкретних коефіцієнтів запасу міцності силових елементів на сприйняття екстремальних навантажень в момент розкриття. Подальша експлуатація понад встановленого терміну при збереженні незмінними коефіцієнтів запасу міцності можлива тільки при обмеженні польотних умов, зокрема, швидкостей десантування. Міцносним властивостям притаманне значне розсіювання. Проектування парашутів проводять з урахуванням гарантованих значень руйнуючих навантажень елементів із заданим рівнем надійності. При цьому повинен бути відомий закон розподілу руйнівних навантажень.

Проведена перевірка застосовності нормального розподілу міцності з використанням складеного критерію згоди. За основу прийняті дані випробувань на міцність до руйнування зразків з строп і тканини купола по основі і по утку. Зразки були вирізані з десантного парашюта Д-5 серія 2 1983 року випуску, запасного парашюта 3-5 1984 року випуску, рятувального парашюта С-5К серія 2 1989 року випуску. В цілому випробуваний 301 зразок з різних матеріалів зазначених парашутів. Відповідно на першому етапі проведено відб-

раковування грубих викидів, далі застосований складовою критерій за умови відповідності нормальному закону.

За підсумками зіставлення з експериментальними даними однозначно показана справедливість нормального закону розподілу руйнівних навантажень для строп і тканин куполів, як по основі, так і по утку.

Отриманий результат дає можливість оцінювати міцнісні характеристики елементів каркаса після експлуатації або тривалого зберігання з необхідним рівнем надійності і, в подальшому, знаходити коефіцієнти деградації міцності силових елементів. Ці коефіцієнти будуть обмежувати максимально допустиму швидкість десантування з конкретним парашутом.

Ключові слова: міцність; руйнівне навантаження; ймовірність; закон розподілу; коефіцієнт деградації.

LAW OF DESTRUCTIVE LOADS DISTRIBUTION OF THE OF PARACHUTE CANOPY'S CARCASE ELEMENTS

P. A. Fomichev, I. M. Sila

It is known that during operation or long-term storage, there is a significant deterioration (degradation) of the strength characteristics of the strength elements of the parachute canopy's carcass, including shroud lines, canopy's fabric, reinforcement tapes, free ends of the suspension system, leg straps, etc.

Parachutes are designed considering the specific safety factors of power elements for the extreme loads resistance at the moment of parachute opening. Further operation after the specified period with unchanged safety factors is possible only in flight conditions limitation, in particular, landing speeds. Strength characteristics are characterized by significant scattering. The design of parachutes is carried out considering the guaranteed values of destructive loads of elements with a given level of reliability. In this case, the law of destructive loads distribution must be known.

It was tested the normal distribution applicability of the strength characteristics applying the compound compliance criterion. The basis is the data of strength tests until the destruction of shroud lines samples and fabric of the canopy warpwise and wefting. The samples were cut from D-5 series 2 parachute of the year 1983, Z-5 reserve parachute of 1984, the rescue parachute C-5 K series 2 of the 1989. It was tested totally 301 samples of various materials from these parachutes. At the first stage of processing the test data, by experimental determination of the breaking load, the gross emissions were rejected, then a composite criterion for compliance with the normal law was applied.

According to the results of comparison with experimental data, the validity of the normal distribution of destructive loads for the shroud lines and canopy's fabrics both warpwise and wefting is unambiguously shown.

The obtained result makes it possible to evaluate the strength characteristics of the carcass elements after operation or long-term storage with the required level of reliability and, in the future, to find the strength degradation factors of the power elements. These factors will limit the maximum allowed landing speed with a specific parachute.

Keywords: strength; failure load; probability; distribution law; degradation coefficient.

Фомичев Петр Александрович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. Прочности летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Сила Игорь Михайлович – начальник научно-исследовательского отдела испытаний вооружения и военной (специальной) техники Десантно-штурмовых войск и Сил специальных операций Государственного научно-исследовательского института испытаний и сертификации вооружения и военной техники, Чернигов, Украина.

Fomichev Petr Alexandrovych – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Aircraft Strength, National Aerospace University "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: nil_prochnost@khai.edu.

Sila Igor Mikhailovich - Head of the Research Department for Testing Weapons and Military (Special) Equipment of the Airborne Assault Troops and the Special Operations Forces of the State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, Chernigov, Ukraine, e-mail: desant1988@ukr.net.