

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;
2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 629.7.023+004.052.42

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-64-76

Анализ адекватности результатов конечно-элементного моделирования фюзеляжа в зоне большого выреза

А.В. Болдырев¹, М.В. Павельчук¹

¹*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия*

Аннотация: Рассматриваются вопросы обеспечения достоверности конечно-элементных моделей (КЭМ) фюзеляжа в зоне выреза под люк на ранних стадиях проектирования летательного аппарата. Сформулированы цель и задачи исследования. Для оценки достоверности математических моделей подобраны объекты, имеющие эталоны. Обсуждаются методы экспериментальных исследований и средства измерений. Приводятся результаты сравнительного анализа численного эксперимента с аналитическими решениями и данными натурных экспериментов. Для валидации КЭМ конструкций определены проверяемые характеристики и типы их проверки. Результаты исследования содержат обсуждение влияния подробности конечно-элементной сетки на коэффициент концентрации напряжений, адекватности моделирования поля напряжений и деформаций в окрестности выреза, учета нелинейности в расчетах на прочность конструкций с концентрацией напряжений. Особое внимание в работе уделено анализу моделирования каркасированной цилиндрической оболочки с большим прямоугольным вырезом, для которой выполнены натурные испытания сотрудниками ЦАГИ. Анализируются деформации силовых шпангоутов, ограничивающих вырез в цилиндрической оболочке, касательные и эквивалентные напряжения в обшивке, нормальные напряжения в стрингерах на пересечении с силовым шпангоутом, смещения сечений шпангоутов в контрольных точках. По результатам исследования сформулированы рекомендации для моделирования тонкостенных конструкций фюзеляжа в зоне большого выреза, обеспечивающие выполнение расчетов с инженерной точностью.

Ключевые слова: оценка достоверности, окантовка выреза, люк, концентратор напряжений, численный эксперимент, аналитическое решение, натурный эксперимент.

Для цитирования: Болдырев А.В., Павельчук М.В. Анализ адекватности результатов конечно-элементного моделирования фюзеляжа в зоне большого выреза // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 4. С. 64–76. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-64-76

Analysis of the results adequacy of the fuselage finite-element modeling in the vicinity of a large cutout

A.V. Boldyrev¹, M.V. Pavelchuk¹

¹*Samara National Research University named after S.P. Korolev (Samara University),
Samara, Russia*

Abstract: The issues of ensuring the reliability of the finite element models (FEM) of the fuselage in the hatch cutout zone are considered at the early aircraft design stages. The purpose and tasks of research are formulated. To assess the reliability of mathematical models, the objects with standards were selected. The methods of experimental research and measuring instruments

are discussed. The results of a comparative analysis of the numerical experiment with analytical solutions and full-size experiments data are presented. For the validation of FEM structures, the checkable characteristics and types of their verification are determined. The results of this research contain a discussion of the impact of finite element mesh details on a stress concentration factor, an adequacy of modeling the stress and strain field in the vicinity of the cutout and taking into account a nonlinearity in strength calculations of structures with stress concentration. This paper focuses on the analysis of modeling a framed cylindrical shell with a large rectangular cutout, for which full-size tests were conducted by TSAGI researchers. Strains of strong frames, limiting the cutout in a cylindrical shell, shearing and equivalent stress in the skin, normal stresses in stringers at the intersection with the strong frame, displacements of strong frames cross-sections at test points are analyzed. Based on the results of this research, the recommendations for modeling thin-walled fuselage structures in the vicinity of a large cutout, ensuring the performance of calculations with engineering accuracy were formulated.

Key words: validity estimation, edge former of cutout, hatch, stress concentration, numerical experiment, analytical solution, full-size experiment.

For citation: Boldyrev, A.V., Pavelchuk, M.V. (2023). Analysis of the results adequacy of the fuselage finite-element modeling in the vicinity of a large cutout. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 4, pp. 64–76. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-64-76

Введение

Фюзеляжи летательных аппаратов оснащаются люками различных размеров. Большие вырезы в конструкции фюзеляжа нарушают регулярность каркаса, приводят к появлению деформации сечений, существенных изгибающих моментов вдоль контуров вырезов и концентраторов напряжений в элементах конструкции. Необходимость достоверного исследования этих эффектов предъявляет специфические требования к параметрам функциональных математических моделей, разрабатываемых уже на ранних стадиях проектирования летательных аппаратов.

В проектировании авиационной техники важной задачей является отыскание рациональной окантовки фюзеляжа в зоне выреза под люк¹. На весовую эффективность упругой системы в этой зоне влияет выбор силовой схемы конструкции [1, 2], формируемой на основе топологической оптимизации с учетом требований прочности, жесткости, устойчивости и ресурса [3–5]. Подробное исследование области поиска в итерационном процессе оптимизации возможно на основе достижения компромисса между точностью и эффективностью расчетов переменных состояния конструкции, выполняемых на математических моделях.

В настоящей статье рассматриваются вопросы обеспечения достоверности конечно-элементных моделей (КЭМ) фюзеляжей в зонах больших вырезов. Численные расчеты проведены в программной среде NASTRAN [6].

Методы и методология исследования

Цель исследования – проверить адекватность математического моделирования цилиндрических оболочек типа «фюзеляж» в зоне большого выреза, сформулировать рекомендации по разработке КЭМ подобных конструкций. Сущность проводимого эксперимента заключается в сравнении результатов, полученных на математических моделях специально подобранных объектов, с эталонами.

Задачи анализа достоверности математических моделей, решаемые в работе:

- 1) исследовать влияние подробности сетки модели на коэффициент концентрации напряжений K_σ [7, 8] на контуре выреза в КЭМ и определить точность полученных результатов;
- 2) оценить адекватность моделирования поля напряжений и деформаций в окрестности выреза;
- 3) проверить целесообразность учета нелинейного поведения конструкции в зоне большого выреза.

¹ МС-21 – передовые технологии, воплощенные в самолет // Крылья Родины. 2016. № 6. С. 10–23.

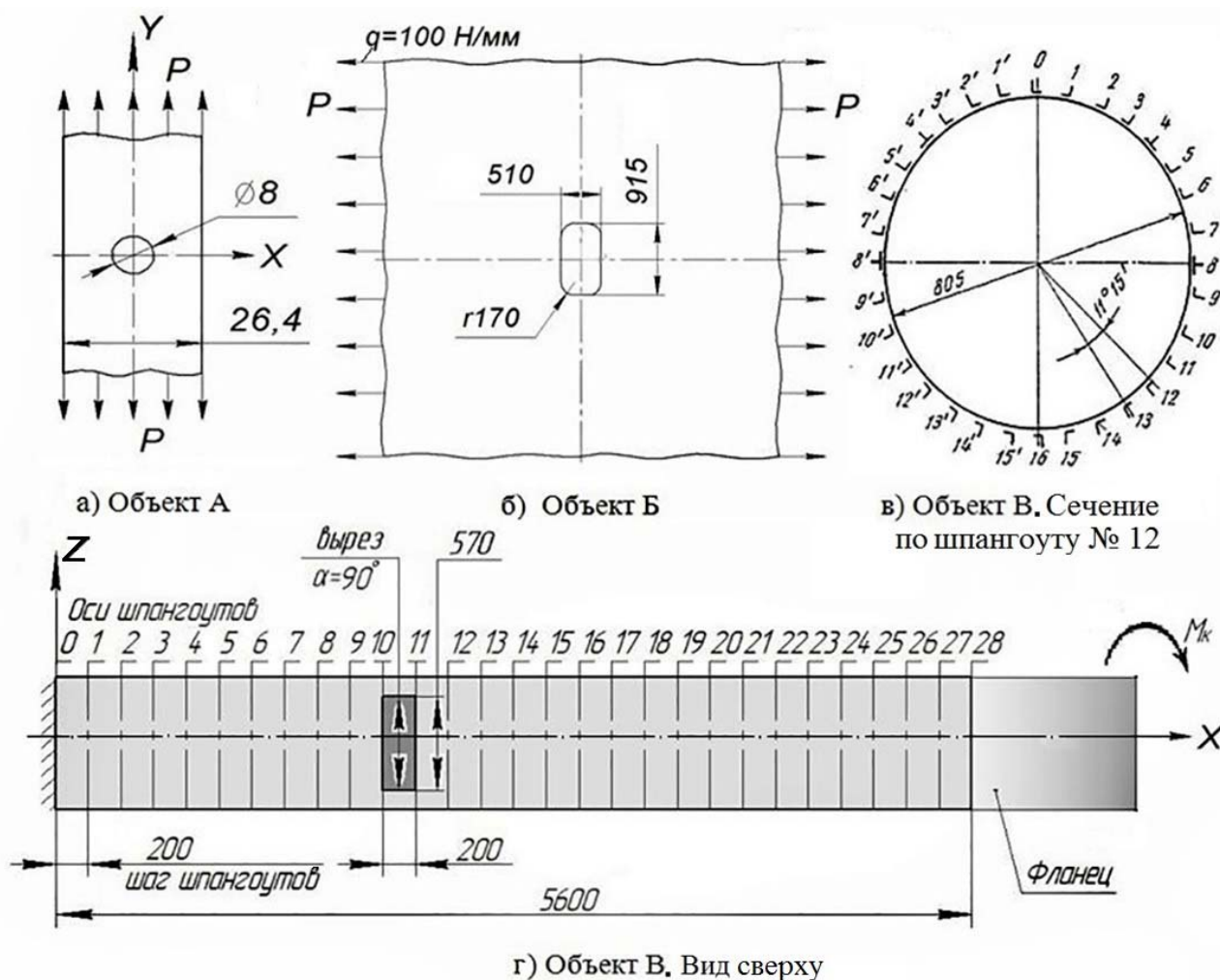


Рис. 1. Исследуемые объекты для оценки достоверности математических моделей фюзеляжа в зоне выреза
Fig. 1. Objects under study to assess the reliability of the mathematical fuselage models in the vicinity of a cutout

Объекты исследования, имеющие эталоны, выбраны с использованием принципа «от простого к сложному»:

А – бесконечная полоса с круглым отверстием [7, 8];

Б – бесконечная пластина с большим прямоугольным отверстием с закругленными углами [9], размеры отверстия подобраны с учетом рекомендаций С.М. Егера [10] для проектирования аварийного выхода магистрального пассажирского самолета [11]. Пластина считается «бесконечной», если ширина растянутой полосы превышает пятикратный размер диаметра отверстия [8];

В – каркасированная цилиндрическая оболочка типа «фюзеляж» с большим прямоугольным вырезом [12].

Характеристики исследуемых объектов представлены на рис. 1.

В настоящем исследовании результаты численного моделирования объекта А сравниваются с данными натурного эксперимента [7], а также с известным теоретическим решением [8].

Эталоном для объекта Б является точное аналитическое решение [9].

Объект В исследуется на случай нагружения крутящим моментом. Результаты численных расчетов сравниваются с данными натурного эксперимента, выполненного в ЦАГИ [12]. Выбор расчетного случая нагружения конструкции объясняется тем, что каркасированная оболочка, имеющая на участке выреза незамкнутое поперечное се-

чение, характеризуется низкой жесткостью на кручение, большими градиентами деформаций и внутренних усилий.

Методы исследования

1. Методы натурного эксперимента

1.1. *Метод фотоупругости.* Данный метод обладает достаточной точностью, простотой и наглядностью [13]. Метод фотоупругости эффективно используется при определении концентрации напряжений на прозрачных моделях в зоне отверстий для тонких пластин, изготовленных из изотропных материалов с высокой оптической чувствительностью [14]. Метод применяется для исследования объекта А.

1.2. *Метод тензометрии.* Тензометрический метод измерения деформаций подробно рассмотрен в [13]. Он применяется для исследования объекта В. Согласно методике натурного эксперимента [12] при исследовании опытной каркасированной цилиндрической оболочки проводится измерение деформаций стрингеров и обшивки с использованием проволочных тензометров. Опытная оболочка с вырезом содержит 630 тензометров. Для анализа поведения стрингеров используются тензодатчики ДК-25, для обшивки с обеих сторон применяются тензодатчики типа ДК-10. При нагружении опытной оболочки регистрация показаний тензодатчиков осуществляется с использованием электронных измерителей деформаций ЭИД-1, ЭИД-3. В результате проведения испытаний измеренные в определенных элементах конструкции нормальные и касательные напряжения усреднялись.

2. Методы модельного эксперимента

2.1. *Аналитический метод.* В работе [9] на основе статистической обработки данных из литературных источников получены уравнения для определения $K\sigma$. Погрешность аппроксимации уравнений [9] не превышает 5 %. Метод применяется для исследования объекта Б.

2.2. *Численный метод.* Численный анализ рассматриваемых объектов осуществляется

методом конечных элементов в среде системы NASTRAN [6]. Моделирование тонкостенных объектов А и Б, а также оболочки и стенок шпангоутов в объекте В осуществляется элементами PLATE. Моделирование поясов шпангоутов выполняется элементами ROD, стрингеров – элементами BEAM. Для измерения $K\sigma$ на контуре выреза в численных моделях применяется прием [15], который заключается в размещении вдоль длины контура выреза последовательности стержневых индикаторных элементов ROD малой жесткости. Для оболочечных элементов определение эквивалентных напряжений осуществляется по теории прочности Генки – Губера – Мизеса.

Результаты исследования

Оценка влияния подробности сетки на коэффициент концентрации напряжений

Объект А. Рассматривается равномерное растяжение вдоль оси Y с усилиями $P = 40,3$ Н/мм бесконечной полосы [7, 8], называемой далее пластиной. Пластина имеет толщину 6,05 мм и изготовлена из материала бакелит ВТ-61-893 со следующими характеристиками: модуль упругости $E = 4246,3$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,365$.

Исследуется вопрос о влиянии сгущения сетки КЭМ на расчетные значения $K\sigma$. Степень подробности сетки оценивается на основе числа элементов вдоль контура отверстия N_b . Также оценивается минимально необходимое количество рядов конечных элементов правильной формы в зоне концентрации напряжений. Под правильной формой в плане в случае двумерных конечных элементов понимается квадрат, прямоугольник или близкие к ним фигуры [15]. На рис. 2 показаны результаты численных расчетов, теоретические и экспериментальные значения $K\sigma$.

Установлено, что для получения достоверных результатов в КЭМ необходимо обеспечить хотя бы один ряд конечных эле-

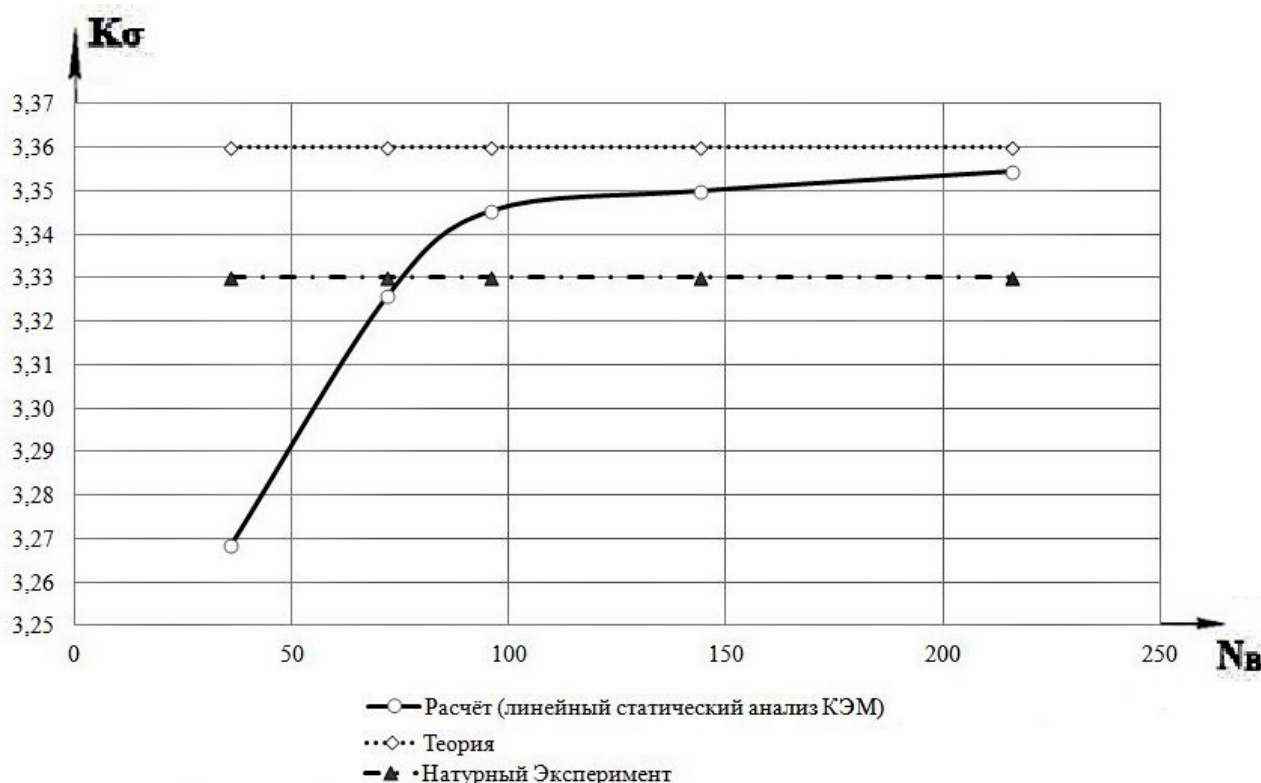


Рис. 2. Зависимость коэффициента концентрации напряжений K_σ на контуре выреза от числа элементов N_v для КЭМ с различной густотой сетки
Fig. 2. The dependence of the stress concentration factor K_σ on a cutout contour on the number of elements N_v for FEM with different mesh density

ментов правильной формы в зоне концентрации напряжений. Приемлемая точность расчетов достигается при использовании в КЭМ более 100 конечных элементов на контуре отверстия пластины. При выполнении этих условий наибольшая погрешность определения нормальных напряжений в элементах пластины составляет 3,7 %, а максимальных касательных напряжений – не более 5%.

Объект Б. Рассматривается растяжение бесконечной пластины толщиной $\delta = 1$ мм, содержащей прямоугольное отверстие с закругленными углами. Характеристики используемого конструкционного материала пластины: модуль Юнга $E = 70\,000$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$.

Значение K_σ для заданной пластины, найденное на основе аналитического решения по формулам [9], составляет 3,543. Численное значение K_σ на контуре отверстия на основе

линейного статического анализа КЭМ конструкции равно 3,799.

Далее исследуется вопрос о выборе числа рядов элементов правильной формы вокруг отверстия. Разница значений K_σ , полученных на КЭМ с одним и двумя рядами элементов правильной формы в зоне концентрации напряжений, составляет не более 0,1 %.

Оценка адекватности моделирования поля напряжений и деформаций в окрестности выреза

Объект А. Сравнивается качественный характер визуализации данных натурального эксперимента [7] с результатами численного решения. На рис. 3 показаны картины распределения наибольших касательных напряжений для интерференционных полос, полученных мето-

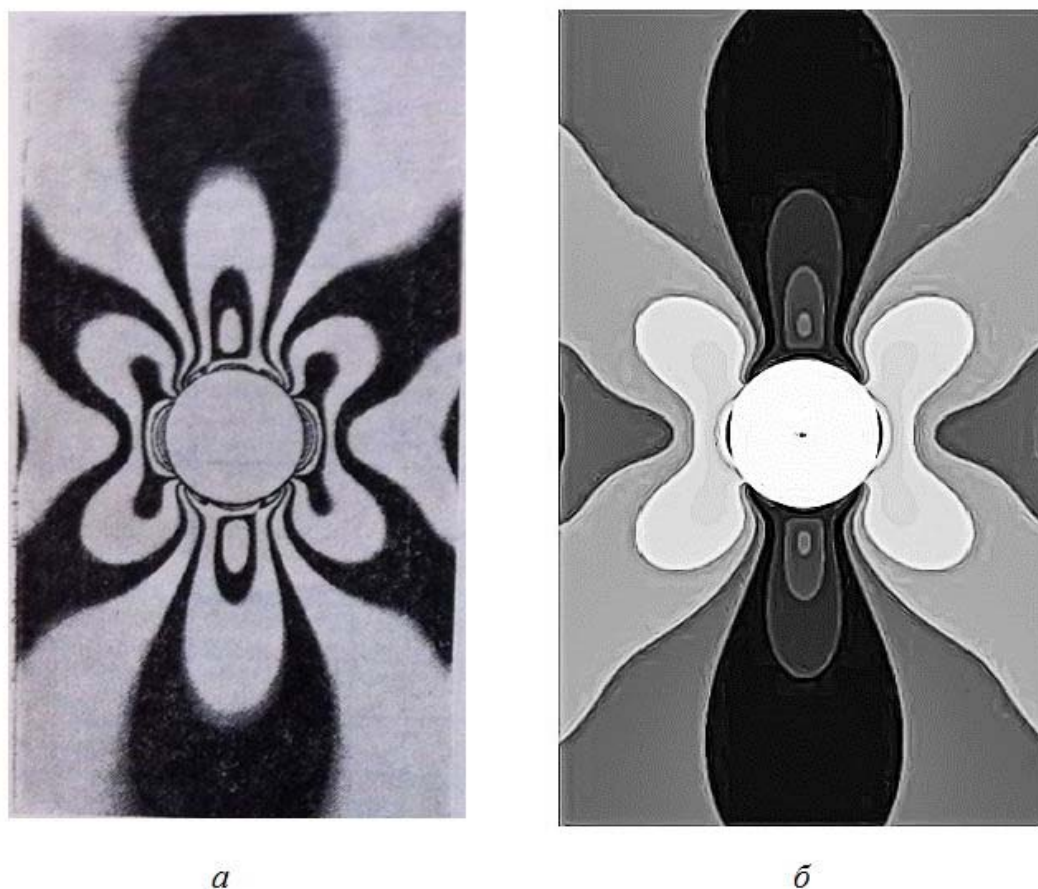


Рис. 3. Распределение наибольших касательных напряжений в объекте А:
а – натурный эксперимент – метод фотоупругости; б – КЭМ с $N_v = 216$

Fig. 3. Distribution of the maximum shear stresses in object A:
а – full-size experiment – photoelasticity method; б – FEM with $N_v = 216$

дом фотоупругости на бакелитовой модели [7, 8] и численного расчета КЭМ с $N_v = 216$.

Анализ картины результатов численного решения демонстрирует существенное визуальное сходство с картиной, полученной по данным натурного эксперимента на основе метода фотоупругости.

Объект В. Рассматривается цилиндрическая каркасированная оболочка, содержащая большой прямоугольный вырез, нагруженная крутящим моментом $M_x = 9,8$ кН·м. Опытная оболочка испытывается на экспериментальной установке ЦАГИ [12]. Натурный образец оболочки содержит обшивку, 27 шпангоутов и 32 стрингера, расположенных равномерно с внешней стороны оболочки. Через торцевой шпангоут 0 осуществляется крепление карка-

сированной оболочки к силовой колонне, которая является заделкой. Нагружение оболочки на другом торцевом шпангоуте 28 производится через фланец крутящим моментом M_x , приложенным в виде пары сил.

В КЭМ конструкции характеристики материалов и свойства элементов задаются в соответствии с данными, представленными в [12].

В настоящем исследовании рассматриваются следующие вопросы.

- **Выбор подробности сетки КЭМ**

Разработаны варианты КЭМ с различной густотой сетки, характеризующиеся числом конечных элементов обшивки N_x вдоль одной шпации шпангоутов, как показано на рис. 4.

Наиболее точные результаты получены для КЭМ с сеткой $N_x = 12$, которая показана на рис. 5. Погрешность максимальных экви-

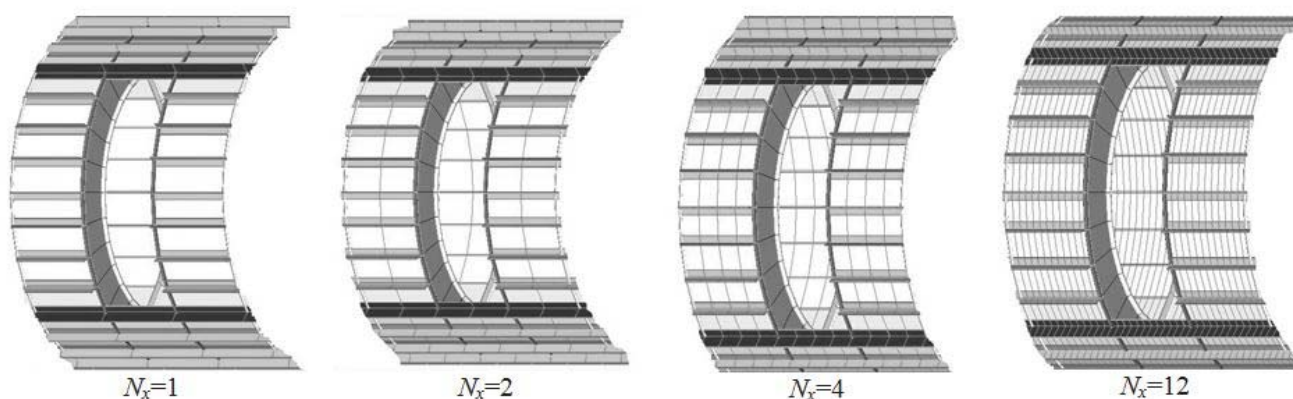


Рис. 4. Фрагменты КЭМ фюзеляжа в зоне большого выреза при $N_x = 1, 2, 4, 12$
Fig. 4. Fuselage FEM fragments in the large cutout zone at $N_x = 1, 2, 4, 12$

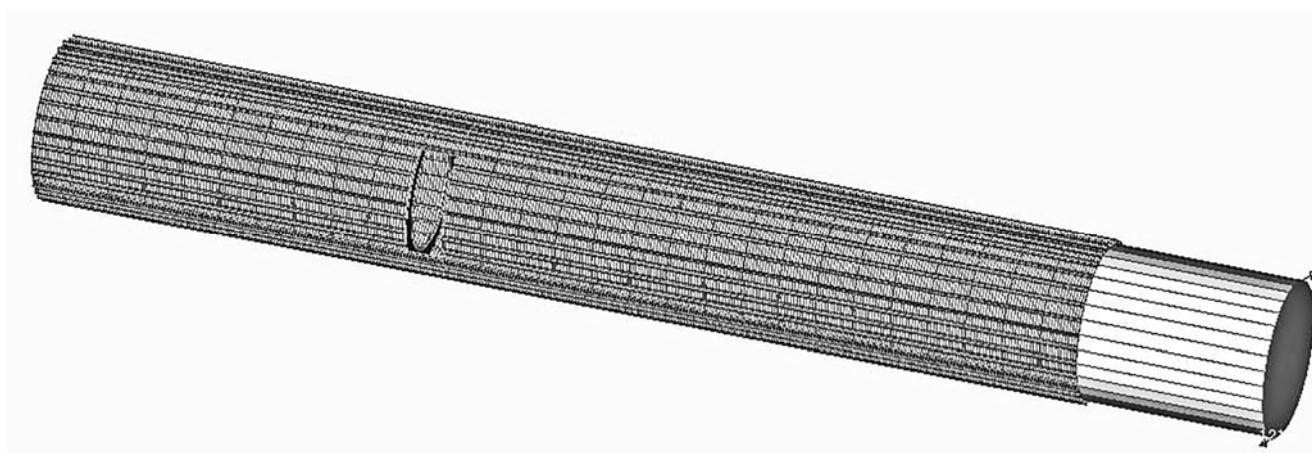


Рис. 5. КЭМ фюзеляжа в зоне большого выреза с сеткой $N_x = 12$
Fig. 5. Fuselage FEM in the large cutout zone with mesh $N_x = 12$

валентных напряжений в элементах обшивки этой модели составляет менее 5 %.

- *Анализ касательных напряжений в обшивке*

Рассматриваются элементы обшивки, расположенные вдоль продольного края выреза, ограниченного между стрингером-бимсом 4 и стрингером 5. Для КЭМ с $N_x = 12$ в наиболее нагруженном элементе обшивки численное значение касательного напряжения составляет 21,1 МПа. Экспериментальное значение для данного элемента составляет 23,34 МПа.

- *Анализ нормальных напряжений в стрингерах*

Экспериментальное значение нормального напряжения в стрингере-бимсе 4 на пере-

сечении с силовым шпангоутом 10 составляет 12,36 МПа. Для КЭМ с сеткой $N_x = 12$ расчетное значение в этом элементе составляет 13,12 МПа.

- *Оценка смещения сечений шпангоутов при измерении в экспериментальной точке*

Рассматриваются значения общих деформаций оболочки по сечениям шпангоутов. В эксперименте ЦАГИ с использованием индикаторов и угломеров по шпангоутам 0, 5, 10, 11, 14, 18, 20, 24 и 27 измеряются смещения сечений оболочки а в направлении оси Z, показанные на рис. 6. Для измерения смещений а в экспериментальных точках А, расположенных вдоль длины оболочки с ординатой $b = 440$ мм, применяется мессура.

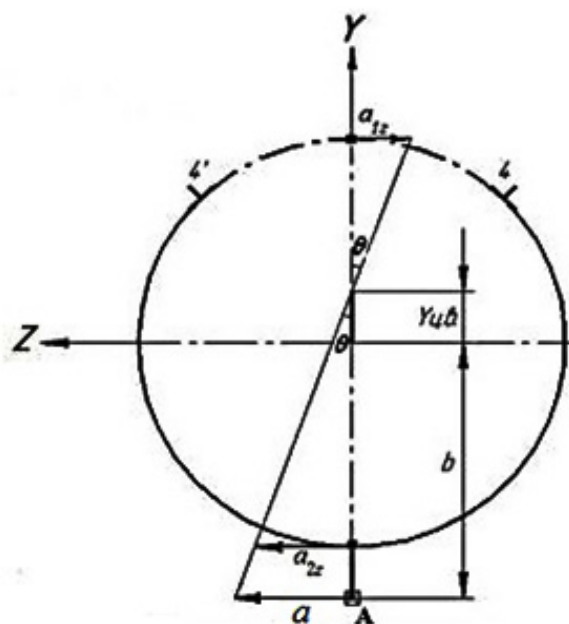


Рис. 6. Схема определения смещения a сечения оболочки в точке А
Fig. 6. The scheme for determining the displacement of a shell section at point A

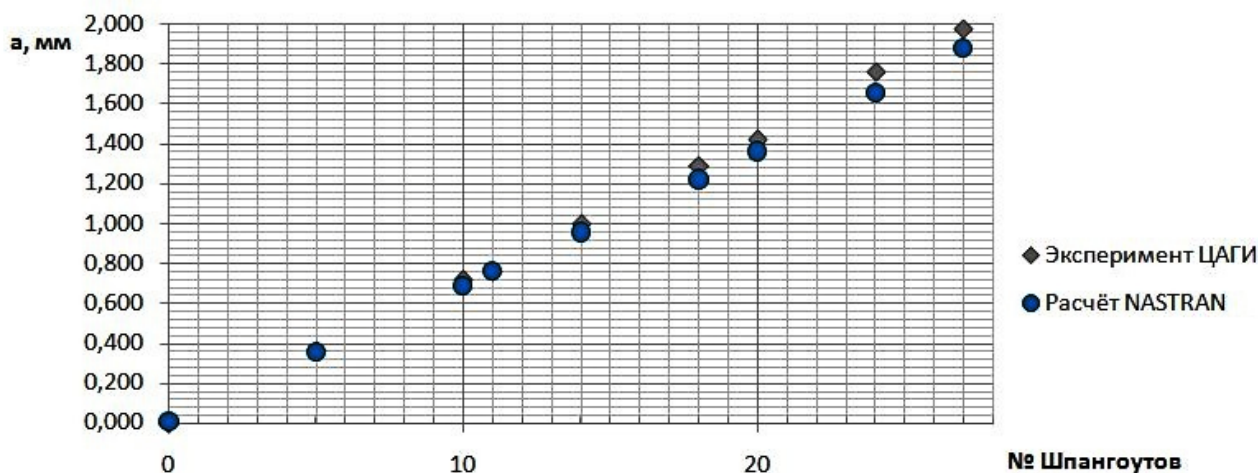


Рис. 7. Смещения a (мм) в экспериментальных точках А
Fig. 7. Displacements of a (mm) at experimental points A

В проведенном вычислительном эксперименте определяются величины смещения a_{1z} и a_{2z} , измеряемые в верхней и нижней точке сечения КЭМ. Эти смещения оболочки, опирающиеся на углы поворота θ сечений, применяются для вычисления величины смещения сечений a . Величина $Y_{ц.в.}$ характеризует ординату центра поворота рассматриваемого сечения оболочки.

На рис. 7 представлены смещения a в экспериментальных точках А, определенные в результате натурного эксперимента и численного расчета. Анализ результатов показывает, что максимальный разброс значений a при сравнении расчетных и экспериментальных значений в рассматриваемых сечениях оболочки не превышает 6,3 %.

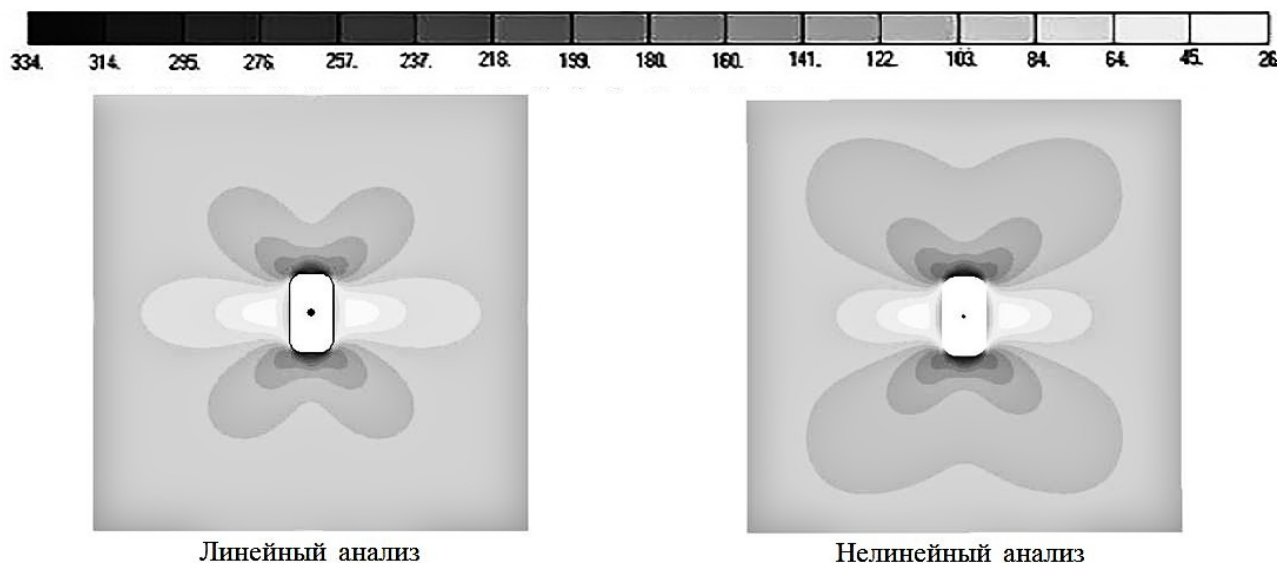


Рис. 8. Картины распределения эквивалентных напряжений в бесконечной пластине с большим прямоугольным отверстием с закругленными углами, МПа

Fig. 8. Pictures of the equivalent stress distribution in the infinite plate with a large rectangular rounded-corner hole, МПа

Учет нелинейности в расчетах на прочность конструкций с концентрацией напряжений

Объект Б. Задаются характеристики конструкционного материала: модуль Юнга $E = 70\,000$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, предел текучести $\sigma_T = 294,2$ МПа [16].

На рис. 8 представлены картины распределения эквивалентных напряжений для линейного и нелинейного статического анализа объекта Б.

Качественный анализ картин на рис. 8 демонстрирует в нелинейном анализе существенно большее включение материала в силовую работу конструкции в отдалении от концентратора напряжения.

В ходе нелинейного статического анализа объекта Б получено значение K_σ равное 3,34.

Нелинейный расчет объекта Б, для которого отношение длины выреза к внешнему диаметру оболочки составляет 2,5, рассматривается в работе [17].

Подробные исследования, демонстрирующие необходимость проведения статического анализа нерегулярных конструкций с учетом физической и геометрической нелинейности,

представлены в [18]. Особенности нелинейного статического расчета конструкций на основе видов анализа Nonlinear Static и Advanced Nonlinear Static рассмотрены в работах [6, 19].

Обсуждение полученных результатов

В табл. 1 представлены результаты исследования объектов для оценки достоверности математических моделей тонкостенной КЭМ фюзеляжа в зоне больших вырезов. Используются следующие условные обозначения по типам проверок: СА – сравнение проверяемой характеристики с точным аналитическим решением, СН – сравнение с данными натурального эксперимента.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие рекомендации для моделирования фюзеляжей в зонах вырезов под люк.

1. Для моделирования обшивки фюзеляжа вдоль контура выреза необходимо использовать хотя бы один ряд элементов правильной формы.

2. В КЭМ вдоль контура выреза целесообразно использовать не менее 150 конечных

Таблица 1
Table 1

Матрица валидации КЭМ конструкции с вырезом
Validation matrix for FEM of the structure with the cutout

Объект	Проверяемые характеристики	Тип проверки	Погрешность, ϵ , %
А. Пластина с круглым отверстием	К σ	СН	2,0
	Нормальное напряжение в элементах полосы	СН	3,7
	Максимальное касательное напряжение в элементах полосы	СН	5,0
Б. Пластина с прямоугольным отверстием	К σ (линейный анализ)	СА	6,7
	К σ (нелинейный анализ)	СА	5,7
В. Каркасированная цилиндрическая оболочка с большим прямоугольным вырезом	Эквивалентное напряжение в обшивке в наиболее нагруженном элементе	СН	0,7
	Максимальное касательное напряжение в обшивке в наиболее нагруженном элементе	СН	7,5
	Нормальное напряжение в стрингере-бимсе на пересечении с силовым шпангоутом	СН	6,1
	Смещение сечений шпангоутов	СН	6,3

элементов, что позволяет получить приемлемую точность расчетов при высокой вычислительной эффективности.

3. Для разбиения сеткой конечных элементов обшивки и стрингеров вдоль одной шпации шпангоутов фюзеляжа следует использовать не менее 12 конечных элементов.

4. В расчетах на прочность конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза необходимо учитывать возникающие эффекты физической и геометрической нелинейности.

Заключение

Исследование вопросов обеспечения достоверности математических моделей в настоящей статье позволяет выделить следующие основные результаты.

1. Разработана методика исследования достоверности моделирования конструкции фюзеляжа в зоне большого выреза. Определены проверяемые характеристики и типы проверки для обеспечения адекватности КЭМ конструкций. Методика основывается на ана-

лизе специально подобранных модельных задач и результатах сравнения численных расчетов с аналитическими решениями и данными натурных испытаний конструкций.

2. Оценка достоверности показала хорошую согласованность экспериментальных и расчетных данных во всех рассмотренных случаях. Сформулированы рекомендации для адекватного функционального моделирования конструкций фюзеляжа в зоне выреза под люк. Выявлены нижние границы для значений параметров сетки КЭМ, позволяющие обеспечить достоверное моделирование рассмотренных объектов при минимальных вычислительных затратах. Знание этих ограничений особенно важно при разработке математических моделей конструкций для целей оптимального проектирования.

Список литературы

1. Болдырев А.В., Павельчук М.В., Синельникова Р.Н. Развитие методики топологической оптимизации конструкции фю-

зеляжа в зоне большого выреза // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26, № 3. С. 62–71.

2. **Niu M.C.Y.** Airframe structural design. Hong Kong: Conmilit Press Ltd, 1988. 612 p.

3. **Болдырев А.В., Комаров В.А.** Проектирование силовой схемы фюзеляжа самолета в зоне большого выреза // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2016. № 8–9. С. 21–26.

4. **Болдырев А.В., Комаров В.А., Павелчук М.В.** Отсек фюзеляжа летательного аппарата с вырезом под люк. Патент № RU 2646175 С1. В64С 1/14: опубл. 01.03.2018. 11 с.

5. **Стрижиус В.Е.** Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций. М.: Машиностроение, 2012. 272 с.

6. **Рычков С.П.** Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

7. **Фрохт М.М.** Фотоупругость: поляризационно-оптический метод исследования напряжений / Пер. с англ. М.Ф. Бокштейн, Ю.Ф. Красонтовича, А.К. Прейсс, под ред. проф. Н.И. Пригоровского. Т. 1. М.–Л.: Гостехиздат, 1948. 432 с.

8. **Савин Г.Н.** Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. 891 с.

9. **Young W.C., Roark R.J., Budynas R.G.** Roark's formulas for stress and strain. 7th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2002. 852 p.

10. **Погосян М.А., Лисейцев Н.К., Стрелец Д.Ю. и др.** Проектирование самолетов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2018. 864 с.

11. **Зинченко В.И.** Конструкция и эксплуатация самолета Ту-154Б (планер, шасси, системы). СПб.: Академия ГА, 1998. 89 с.

12. **Хлебутин Н.В.** Экспериментальное исследование напряжений и деформаций при кручении цилиндрической каркасированной оболочки с прямоугольным вырезом // Труды ЦАГИ. 1961. Вып. 816. 67 с.

13. **Касаткин Б.С.** Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Ло-

банов, В.А. Пивторак, П.И. Полухин, Н.А. Чиченев. Киев: Наукова думка, 1981. 584 с.

14. **Александров А.Я., Ахметзянов М.Х.** Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973. 576 с.

15. **Пересыпкин В.П.** Некоторые прикладные аспекты метода конечных элементов в расчетах авиационных конструкций: дис. ... канд. техн. наук. Куйбышев: КуАИ, 1979. 209 с.

16. **Астахов М.Ф.** Справочная книга по расчету самолета на прочность / М.Ф. Астахов, А.В. Караваев, С.Я. Макаров, Я.Я. Суздальцев. М.: Гос. изд-во оборонной промышленности, 1954. 701 с.

17. **Фомин В.П.** Расчет цилиндрических подкрепленных оболочек с учетом нелинейного поведения элементов конструкции // Ученые записки ЦАГИ. 1980. Т. 11, № 1. С. 72–80.

18. **Perelmuter A.V., Tur V.V.** Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol. 13, no. 3. Pp. 86–102. DOI: 10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102

19. **Рудаков К.Н.** Femap 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. Киев: НТУУ «КПИ», 2011. 317 с.

References

1. **Boldyrev, A.V., Pavelchuk, M.V., Sinelnikova, R.N.** (2019). Enhancement of the fuselage structure topological optimization technique in the large cutout zone. *Aerospace MAI Journal*, vol. 26, no. 3, pp. 62–71. (in Russian)

2. **Niu, M.C.Y.** (1988). Airframe structural design. Hong Kong: Conmilit Press Ltd, 612 p.

3. **Boldyrev, A.V., Komarov, V.A.** (2016). The aircraft fuselage structural layout designing in the region of large cutout. *All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight")*, no. 8–9, pp. 21–26. (in Russian)

4. **Boldyrev, A.V., Komarov, V.A., Pavelchuk, M.V.** (2018). Fuselage compartment of

the aircraft with a hatch cutout. Patent RU no. 2646175 C1. B64C 1/14: publ. March 1, 11 p. (in Russian)

5. **Strizhius, V.E.** (2012). Methods for calculating the fatigue life of aircraft structural elements. Moscow: Mashinostroeniye, 272 p. (in Russian)

6. **Rychkov, S.P.** (2013). Modeling of structures in Femap with NX Nastran. Moscow: DMK Press, 784 p. (in Russian)

7. **Frokht, M.M.** (1948). Photoelasticity: polarization-optical method of stress analysis. Translated from English by Bokstein M.F., Krasontovich Yu.F., Preuss A.K., in prof. Prigorovsky N.I. (Ed). Vol. 1. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, 432 p. (in Russian)

8. **Savin, G.N.** (1968). Stress distribution around holes. Kyiv: Naukova Dumka, 891 p. (in Russian)

9. **Young, W.C., Roark, R.J., Budynas, R.G.** (2002). Roark's formulas for stress and strain. 7th ed., New York: McGraw-Hill Professional, 852 p.

10. **Pogosyan, M.A., Liseytsev, N.K., Sagittarius, D.Yu. et al.** (2018). Aircraft design. 5th ed., pererab i dop. Moscow: Innovatsionnoye Mashinostroyeniye, 864 p. (in Russian)

11. **Zinchenko, V.I.** (1998). Design and operation of the TU-154B aircraft (airframe, landing gear, systems). St. Petersburg: Akademiya GA, 89 p. (in Russian)

12. **Khlebutin, N.V.** (1961). Experimental research of stresses and strains under torsion

a framed cylindrical shell with a rectangular cutout. *Trudy TsAGI*, issue 816, 67 p. (in Russian)

13. **Kasatkin, B.S., Kudrin, A.B., Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Polukhin, P.I., Chichenev, N.A.** (1981). Experimental methods of deformation and stress analysis. Kyiv: Naukova Dumka, 584 p. (in Russian)

14. **Alexandrov, A.Ya., Akhmetzyanov, M.Kh.** (1973). Polarization-optical methods of deformable body mechanics. Moscow: Nauka, 576 p. (in Russian)

15. **Peresypkin, V.P.** (1979). Some applied aspects of the finite element method in aircraft structures calculations: Cand. of Tech. Sc. Thesis. Kuibyshev: KuAI, 209 p. (in Russian)

16. **Astakhov, M.F., Karavaev, A.V., Makarov, S.Ya., Suzdaltsev, Ya.Ya.** (1954). Reference book for an aircraft strength calculation. Moscow: Gosudarstvennoye izdatelstvo oboronnoy promyshlennosti, 701 p. (in Russian)

17. **Fomin, V.P.** (1980). Calculation of cylindrical reinforced shells considering the nonlinear behavior of structure elements. *Uchenyye zapiski TsAGI*, vol. 11, no. 1, pp. 72–80. (in Russian)

18. **Perelmuter, A.V., Tur, V.V.** (2017). Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 86–102. (in Russian)

19. **Rudakov, K.N.** (2011). Femap 10.2.0. Geometric and finite element modeling of structures. Kyiv: NTUU “KPI”, 317 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Болдырев Андрей Вячеславович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарского университета), boldirev.av@ssau.ru.

Павельчук Максим Владимирович, старший преподаватель кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (Самарского университета), pmv90aircraft@gmail.com; pavelchuk_m@mail.ru.

Information about the authors

Andrey V. Boldyrev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Structure and Design Aircraft Chair, Samara National Research University named after S.P. Korolev (Samara University), boldirev.av@ssau.ru.

Maksim V. Pavelchuk, Senior Lecturer of the Structure and Design Aircraft Chair, Samara National Research University named after S.P. Korolev (Samara University), pmv90aircraft@gmail.com; pavelchuk_m@mail.ru.

Поступила в редакцию	10.02.2023	Received	10.02.2023
Одобрена после рецензирования	30.03.2023	Approved after reviewing	30.03.2023
Принята в печать	20.07.2023	Accepted for publication	20.07.2023