

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.78.05

doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-50-61

Методика расчета на прочность волноводов для обеспечения улучшенных массогабаритных параметров*

И.В. Кудрявцев¹, М.М. Михнёв², П.Н. Сильченко¹¹ Сибирский федеральный университет² АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва»

A Calculation Procedure for Strength Analysis of Wave Guides for Ensuring Improved Mass-Dimensional Parameters

I.V. Kudryavtsev¹, M.M. Mikhnev², P.N. Silchenko¹¹ Siberian Federal University² AO Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev

На основе анализа методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) волноводно-распределительных систем космических аппаратов связи разработана методика расчета, обеспечивающая при проектировании волноводов с улучшенными массогабаритными параметрами требуемые прочностные и жесткостные характеристики на воздействия статических, динамических и деформационных нагрузок. На первом этапе методики предложено моделировать волноводно-распределительные системы в глобальной постановке стержневой конструкцией с эквивалентными условиями нагружения и закрепления и определять НДС такой системы. На втором этапе методики следует выделять локальные области с максимальными значениями НДС для дальнейшего уточненного расчета в стержневой системе. Выполнена оценка влияния толщины стенки волновода на его общее НДС. Показано, что при варьировании толщины стенки волновода в диапазоне 0,25...2,50 мм прочность и жесткость его участков под действием статических силовых нагрузок изменяется практически по линейному закону. Установлено, что при динамическом нагружении толщина стенки практически не оказывает влияния на результирующее НДС волновода, возникающее под действием вынужденных колебаний и квазистатического нагружения вследствие его зависимости от соотношений массы, моментов инерции и сопротивления, которые для некоторых типоразмеров волноводов будут практически постоянными величинами. Полученные для стержневой системы зависимости не позволяют оценить влияние толщины стенок на локальное НДС в виде их прогиба, местной потери устойчивости и т. д. В связи с этим на втором этапе в этой системе выделяются интересные локальные области,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта «Разработка методики расчета термоупругого состояния волноводно-распределительной системы космических аппаратов связи на этапе эксплуатации».

преобразуются в объемные тонкостенные конструкции с трансляцией в программы конечно-элементного анализа для более точного расчета. Предлагаемая методика в перспективе позволит решать связанные задачи о взаимосвязи и влиянии деформаций поперечного сечения в локальных зонах волновода на изменения электромагнитных полей с образованием паразитных волн, что существенно улучшит качество радиотехнических характеристик волноводно-распределительных систем с обеспечением их прочности, жесткости и минимальных массогабаритных параметров.

Ключевые слова: космический аппарат, неосесимметричное поперечное сечение, прочность волноводов, жесткость участков волноводов, радиотехнические характеристики, массогабаритные параметры

This paper presents a calculation procedure for designing waveguides with improved mass-dimensional parameters, which ensures the required strength and stiffness characteristics under static, dynamic and deformational loads. The procedure is based on the analysis of methods for determining the stress-strain state of the waveguide-and-distribution systems of spacecraft. The first stage of the procedure involves modelling the waveguide-and-distribution systems in a general formulation by a rod structure with equivalent loading and fixing conditions and determining the stress-strain state of such a system. At the second stage, local areas with the maximum stress-strain state values are selected for a further refined analysis in the rod system. An evaluation of the influence of the waveguide wall thickness on the general stress-strain state is performed. It is shown that when the waveguide wall thickness varies in the range of 0.25–2.50 mm, the strength and stiffness of its sections under static loads basically follow the linear law. It is established that under dynamic loading the wall thickness has almost no effect on the resultant stress-strain state of the waveguide arising under the influence of forced fluctuations and quasi-static loading owing to its dependence on the ratios of mass, moments of inertia and resistance, which for some standard sizes of the waveguides will be almost constant. The equations obtained for the rod system cannot be used for evaluating the influence of the wall thickness on local stress-strain state in the form of wall deflection, local loss of stability, etc. In view of this, at the second stage of modelling local areas of interest are selected and transformed into 3D thin-walled structures, with translation into finite element method programs for a more exact analysis. In the future, the proposed technique can be used to solve connected problems of interrelation and the influence of cross-sectional deformations in local zones of the waveguide on the changes in electromagnetic fields with the formation of parasite waves. This will significantly improve the quality of radio engineering characteristics of the waveguide and distribution systems while ensuring their strength, stiffness and minimal mass-dimensional parameters.

Keywords: spacecraft, non-axisymmetric cross section, wave guide strength, stiffness of wave guide sections, radio engineering characteristics, mass-dimensional parameters

Современное развитие космической техники требует предельных минимальных массогабаритных и максимальных эксплуатационных параметров практически для всех механических конструкций космических аппаратов, в том числе и для волноводно-распределительной системы (ВРС). Снижение массогабаритных параметров конструкций неразрывно связано с ужесточением условий их работы вплоть до выхода на предельные режимы с точки зрения требований по локальной и общей прочности, жесткости, устойчивости, герметичности и особенностям эксплуатации.

ВРС космического аппарата связи представляет собой протяженную пространственно-разветвленную конструкцию, состоящую из

тонкостенных элементов неосесимметричного прямоугольного поперечного сечения (ПС) [1]. Размеры сечения и конфигурация отдельных составляющих элементов ВРС определяются из условий обеспечения ее радиотехнических характеристик, а минимизация массогабаритных параметров достигается в основном уменьшением толщины стенки каждого элемента.

Согласно ГОСТ 20900–2014 [2], при проектировании волновода толщину его стенки рекомендуется принимать в пределах 2...3 мм. Отсутствие специализированных уточненных методов расчета волновода на прочность и жесткость приводит к использованию такой необоснованно завышенной толщины стенки, что значительно увеличивает массу ВРС, кото-

рая для авиационной и космической техники является критичным параметром.

При конструировании протяженных ВРС требуются промежуточные подкрепления — опоры, но отсутствуют четкие рекомендации по выбору мест их установки и координатных направлений по восприятию соответствующих воздействий, что приводит к неэффективной работе опор и возникновению опасных деформаций, влияющих на качество передаваемого сигнала. Например, вследствие недопустимых деформаций прямоугольной формы тонкостенного ПС волноводов появляются различные искажения электромагнитных полей с образованием нежелательных паразитных волн.

Цель работы — создать методику расчета протяженных ВРС на воздействие любых статических и динамических нагрузок, позволяющую на этапах проектирования оперативно оценивать НДС ВРС при любых заданных нагрузках с обеспечением улучшенных массогабаритных и радиотехнических параметров.

Для достижения этой цели необходимо на стадии проектирования волноводов применять обоснованные расчетно-проектно-конструкторско-технологические решения, основанные на предлагаемых методах расчета, которые позволяют оперативно оценить их напряженно-деформированное состояние (НДС) в целом с возможностью выделения локальных областей и их более точного расчета.

Моделирование конструкции ВРС. ВРС космических аппаратов связи образуются соединением отдельных тонкостенных элементов коробчатого ПС различных размеров в зависимости от передаваемых радиочастот (рис. 1). Базовыми элементами являются прямо- и кри-

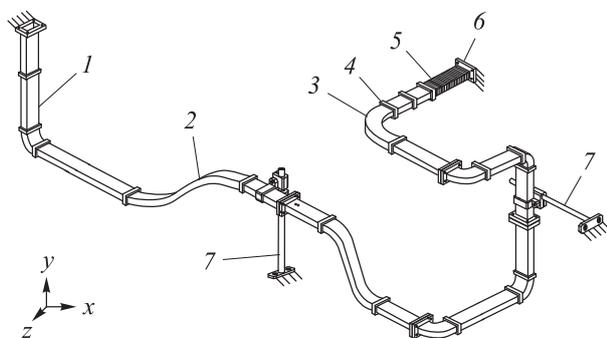


Рис. 1. Пример схемы участка ВРС:
1 — прямолинейный элемент; 2, 3 — криволинейные элементы; 4 — муфта; 5 — гибкая секция; 6 — фланец;
7 — промежуточная опора

волинейные тонкостенные элементы с прямоугольным ПС, соединяемые между собой в отдельные участки с помощью муфт и фланцев.

НДС тонкостенных протяженных конструкций ВРС или отдельных участков волноводов можно рассчитать, используя теории стержней [3, 4], оболочек [5, 6], упругости [7, 8] и др. Особенностью геометрии основных элементов волноводов является форма их ПС, имеющая прямые углы, что затрудняет расчет с применением указанных теорий.

Например, в теории стержней [3, 4] это приводит к трудностям при решении задач о кручении вследствие неосесимметричного ПС, а в теории оболочек [5, 6] возникают проблемы разрывности функции радиуса кривизны, деления на ноль в разрешающей системе уравнений и т. д.

Если смоделировать прямоугольное ПС в виде набора четырех пластин, соединенных между собой под прямым углом, то для каждой из них (оболочки), т. е. для элемента исходной конструкции ВРС, необходимо составить свою систему дифференциальных уравнений с граничными условиями и эквивалентными способам соединения этих пластин между собой. Математическая модель задачи в такой постановке требует совместного решения большого числа систем дифференциальных уравнений [9], получить аналитическое решение которых для всей конструкции ВРС проблематично.

Обзор научно-технической литературы не выявил информации об общем аналитическом решении подобных систем дифференциальных уравнений [10–12]. Известные полуаналитические и численные методы имеют ряд недостатков, основные из которых не позволяют гарантированно и доказательно оценивать точность получаемого результата [13, 14], а при инженерном расчете крупногабаритных протяженных конструкций ВРС численными методами требуются значительные затраты ресурсов ЭВМ.

Вариативность поэтапного моделирования ВРС. Разработанная методика расчета, обеспечивающая высокую точность вычислений, состоит из двух этапов.

На первом этапе моделируется ВРС в глобальной постановке стержневой конструкцией с эквивалентными условиями нагружения и закрепления (рис. 2, а). Соединительные муфты и фланцы считаются отсутствующими, однако на следующем этапе они будут учтены для локальной области каждого участка ВРС.

Система уравнений равновесия такой пространственной стержневой конструкции в статической постановке задачи имеет вид [1]

$$\begin{aligned} [A]\{Q\} + \{P\} &= 0; \\ [A]^T\{W\} + \{\Delta\} &= 0; \\ [D]\{Q\} &= \{\Delta\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $[A]$ — матрица коэффициентов уравнений равновесия; $\{Q\}$ и $\{P\}$ — вектор внутренних и внешних усилий; $\{W\}$ — вектор перемещения узлов стержневой конструкции; $\{\Delta\}$ — вектор деформации отдельных стержней; $[D]$ — матрица податливости.

В системе (1) первое выражение является уравнением статического равновесия, второе определяет условия совместности деформаций, третье устанавливает соотношение напряжений и деформаций для отдельных стержней (закон Гука).

Для проектирования и расчета волноводов разработаны рекомендации по обеспечению необходимых показателей прочности и жесткости [14–17]. Однако они не гарантируют выполнения специальных требований государственного стандарта [18], и получения минимальных массогабаритных параметров ВРС.

По результатам расчета ВРС как стержневой конструкции на первом этапе определяется общее НДС и выделяется любая интересующая расчетчика область или локальные участки с опасным сечением, которые совместно с краевыми, начальными условиями и другими параметрами уточнено исследуются на втором этапе расчета.

На втором этапе для дальнейшего уточненного расчета из стержневой модели выделяется требуемый локальный участок, который транс-

лируется в программный комплекс ANSYS или Nastran в виде твердотельной модели. К участку прикладываются как внешние воздействия, так и граничные условия, возникающие на его краях. Локальный участок имеет малый размер, и его конечно-элементное разбиение можно выполнять по рекомендациям, приведенным в работе [19], что позволит достичь необходимой точности искомого параметра НДС.

На основе разработанных методик расчета созданы модули, составляющие единый программный комплекс [20–27], который автоматизирует все действия по вычислению параметров НДС волновода. С помощью полученных результатов расчетчик-проектировщик сможет обоснованно определять места установки и ориентации опор с соответствующими характеристиками на проектируемом волноводе для достижения требуемых параметров НДС.

Разработанные методики расчета позволяют решать разнообразные задачи применительно к проектированию волноводов с минимизацией массогабаритных параметров, что актуально для космической и авиационной техники.

Например, одним из эффективных путей снижения массы волновода является уменьшение толщины его стенки. Однако этот подход приводит к существенному перераспределению статического и динамического НДС. Обосновать уменьшение толщины стенки до минимального значения и одновременно решить задачу для ВРС с максимальным НДС можно на основе применения разработанных методик и программ расчета.

Оценка влияния толщины стенки элемента на НДС волновода. Результаты расчета, получен-

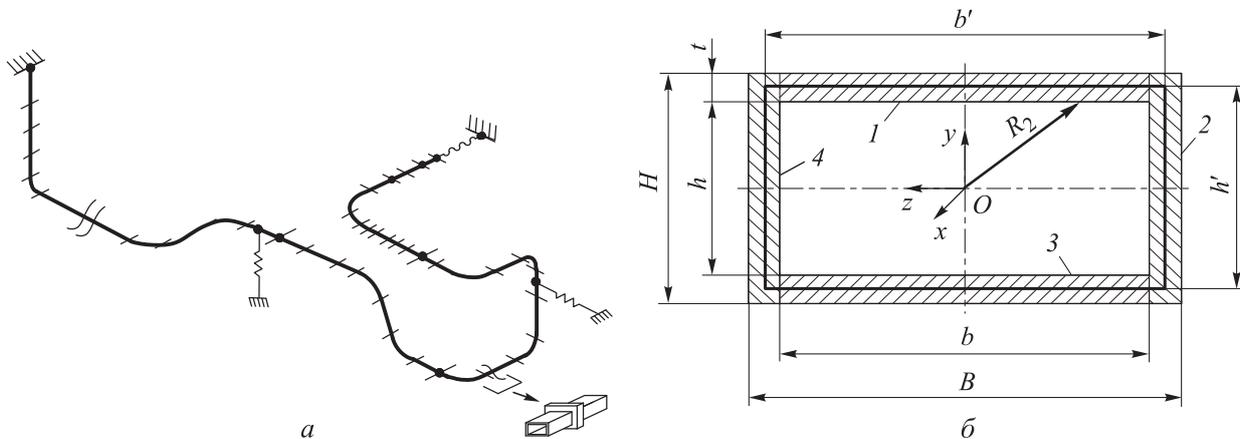


Рис. 2. Схемы выделенного локального участка (а) и ПС (б) стержневой модели волновода: 1–4 — номера стенок; t — толщина стенки; H и h — высота сечения и его канала; B и b — ширина сечения и его канала; b' и h' — срединная ширина и высота; R_2 — радиус кривизны

ные на первом этапе, позволяют определить геометрические размеры ПС элемента и толщину его стенки, от которых зависит масса отдельного участка, а также оценить инерционные силовые воздействия при заданных условиях динамических процессов.

Масса волновода

$$m = \rho S l, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала волновода; S — суммарная площадь ПС стенок; l — протяженность участка волновода.

Очевидно, что масса участка волновода единичной длины определяется площадью его ПС, которая зависит только от толщины стенки:

$$S(t) = -4t^2 + (B + H)2t. \quad (3)$$

Для проведения расчетного исследования выбраны диапазон варьирования толщины стенки волновода $t = 0,25 \dots 2,50$ мм и типоразмер ПС 15×35 мм. Несмотря на квадратичную зависимость (3), влияние толщины стенки на площадь волновода можно считать практически линейным (рис. 3).

Для рассматриваемого примера это означает, что при уменьшении толщины стенки волновода в 10 раз (с 0,25 до 2,50 мм) площадь его ПС, а следовательно, и масса его конструкции, снизились в 9,2 раза. Таким образом, уменьшение толщины стенки волновода является эффективным способом снижения массы его конструкции. Однако это негативно скажется на прочности и жесткости волновода.

Основными геометрическими параметрами ПС волновода, от которых зависят прочность и жесткость, являются площадь ПС, крутильный и осевой моменты инерции, а также моменты сопротивления. Каждый из перечисленных параметров оказывает воздействие на напряжения и деформации, действующие по известным зависимостям механики [3, 4], из которых

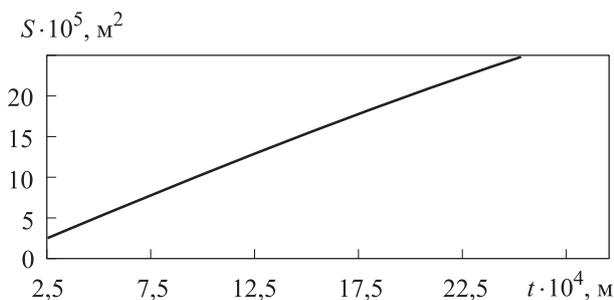


Рис. 3. Зависимость площади ПС S волновода от толщины его стенки t

можно определить влияние толщины стенки на НДС при различных видах нагружения.

При растяжении и сжатии прочность и жесткость волновода оцениваются возникающими нормальными напряжениями σ_N и деформациями Δl , зависящими от площади его ПС [3]:

$$\sigma_N(t) = \frac{N}{S(t)}; \quad \Delta l(t) = \frac{Nl}{ES(t)},$$

где N — продольная сила; E — модуль Юнга.

На основе графика, приведенного на рис. 3, напряжения и деформации при растяжении-сжатии можно считать обратно пропорциональными толщине стенки волновода:

$$\sigma_N(t) \sim \frac{1}{t}; \quad \Delta l(t) \sim \frac{1}{t}.$$

Для протяженных волноводов изгиб является одним из самых критичных видов их нагружения. Изгибная прочность участка волновода определяется моментом сопротивления его ПС. Рассматривая наиболее опасный случай изгиба участка волновода в плоскости его наименьшей жесткости, получаем следующую зависимость момента сопротивления от толщины его стенки [28]:

$$W_z(t) = \frac{BH^2 - bh^2}{6} = \frac{2}{3}t^3 - t^2(B + 2H)\frac{1}{3} + t(2B - H)\frac{1}{6}H. \quad (4)$$

Несмотря на кубическую зависимость (4), влияние толщины стенки волновода на момент сопротивления ПС можно считать практически линейным в диапазоне $t = 0,25 \dots 2,50$ мм (рис. 4).

При уменьшении толщины стенки волновода в 10 раз момент сопротивления его ПС снижается в 6,9 раза.

Изгибная жесткость волновода определяется моментом инерции его ПС. Рассматривая изгиб участка волновода в плоскости его наименьшей жесткости, получаем следующую зависимость момента инерции ПС от толщины стенки [28]:

$$J_z(t) = \frac{BH^3 - bh^3}{12} = -t^4 \frac{4}{3} + t^3 (3H + B) \frac{2}{3} - t^2 (B + H)H + t(3B + H) \frac{H^2}{6}. \quad (5)$$

Уменьшение толщины стенки волновода в 10 раз привело к снижению осевого момента инерции его ПС в 7,2 раза (рис. 5).

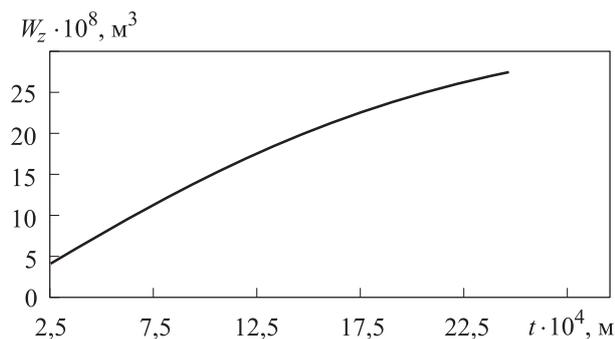


Рис. 4. Зависимость момента сопротивления ПС W_z волновода от толщины его стенки t

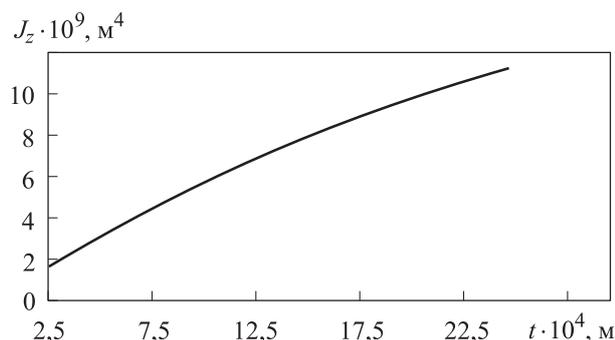


Рис. 5. Зависимость осевого момента инерции ПС J_z волновода от толщины его стенки t

Осевой момент инерции влияет на прогибы u_y стержневой модели участков волновода, которые определяются из дифференциального уравнения упругой линии [3]

$$\frac{d^2 u_y}{dx^2} = \frac{M_z}{EJ_z},$$

где M_z — изгибающий момент.

После интегрирования зависимость прогибов от осевого момента инерции будет линейной, а с учетом выражения (5) они обратно пропорциональны толщине стенки волновода:

$$u_y(t) \sim \frac{1}{t}.$$

Осевой момент инерции ПС также влияет на устойчивость прямых участков волновода при продольном изгибе, которая оценивается по формуле Эйлера [3]

$$F_{кр} = \left(\frac{\pi}{\mu l} \right)^2 EJ_z,$$

где $F_{кр}$ — критическая сила; μ — коэффициент приведения длины.

Критическая сила $F_{кр}$ прямо пропорциональна осевому моменту инерции ПС при его изгибе. Следовательно, зависимость критиче-

ской силы от толщины стенки в рассматриваемом диапазоне будет также обратно пропорциональной:

$$F_{кр}(t) \sim t.$$

Следует отметить, что в литературе по теориям упругости, оболочек и даже стержней отсутствуют «точные» аналитические зависимости, определяющие НДС неосесимметричных тонкостенных конструкций при кручении волнопроводов.

Самыми распространенными приближенными выражениями для полярных моментов инерции и сопротивления являются формулы Р. Бредта [29], которые в рассматриваемом случае имеют следующий вид:

$$J_p = \frac{4\omega^2}{\oint \frac{dS}{t}}; \tag{6}$$

$$W_p = 2\omega t, \tag{7}$$

где ω — площадь сечения, заключенная внутри срединной линии тонкостенного ПС волновода (рис. 2, б),

$$\omega = b'h' = (B-t)(H-t); \tag{8}$$

$$\oint \frac{dS}{t} =$$

интеграл по замкнутому контуру срединной линии ПС (см. рис. 2, б),

$$\oint \frac{dS}{t} = \frac{2}{t}(b'+h') = \frac{2}{t}(H+B-2t). \tag{9}$$

После подстановки выражений (8) и (9) в формулы (6) и (7) получаем

$$J_p = 2t \frac{[(B-t)(H-t)]^2}{H+B-2t};$$

$$W_p = 2t^3 - 2(B+H)t^2 + 2BHt.$$

Подстановка числовых данных показывает, что уменьшение толщины стенки в 10 раз приводит к снижению полярного момента инерции в 7,3 раза, а полярного момента сопротивления ПС в 8,2 раза, что в первом приближении также можно считать линейными зависимостями (рис. 6, а и б).

Предлагаемые для расчета НДС зависимости геометрических параметров волновода от толщины его стенки в первом приближении показывают практически линейное изменение жесткости и прочности конструкции при всех ста-

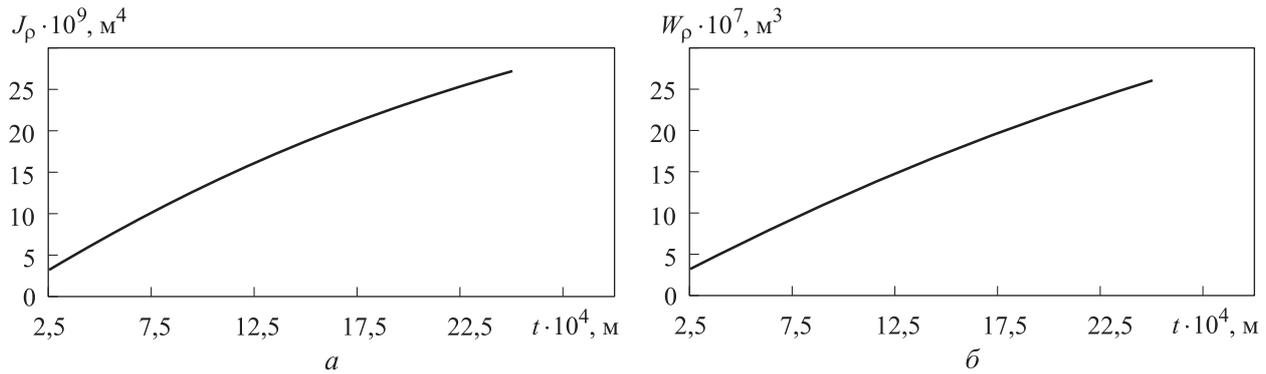


Рис. 6. Зависимости полярных моментов инерции J_p (а) и сопротивления W_p (б) ПС волновода от толщины его стенки t при кручении

тических воздействиях, включая потерю устойчивости.

В случае динамических воздействий (таких как квазистатическое нагружение и вынужденные колебания) важную роль в результатах расчета НДС играет масса конструкции волновода, также зависящая от толщины стенки согласно зависимостям (2) и (3).

Для самого распространенного и опасного случая поперечного изгиба шарнирно опертого прямого участка волновода под действием некоторого ускорения a_y выражение для вычисления изгибных напряжений имеет вид [28]

$$\sigma_{M_z}^{dyn}(t) = \frac{M_z(t)}{W_z(t)} = \frac{\rho a_y l}{8} \frac{S(t)}{W_z(t)}. \quad (10)$$

Исключая из рассмотрения не зависящие от толщины стенки параметры первого сомножителя формулы (10), получаем выражение для определения нормальных напряжений изгиба, возникающих под действием сил инерции,

$$\begin{aligned} \sigma_{M_z}^{dyn}(t) &\sim \frac{S(t)}{W_z(t)} = \\ &= \frac{-4t^2 + (B+H) \cdot 2t}{\frac{2}{3}t^3 - t^2(B+2H)\frac{1}{3} + t(2B-H)\frac{1}{6}H}. \quad (11) \end{aligned}$$

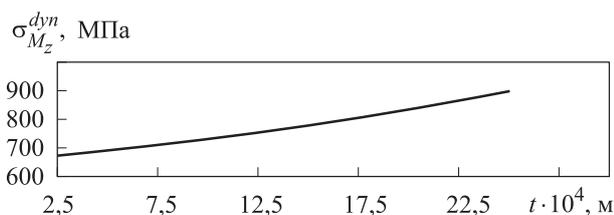


Рис. 7. Зависимость нормальных напряжений изгиба $\sigma_{M_z}^{dyn}$, возникающих под действием сил инерции, от толщины стенки t волновода

После подстановки размеров ПС в выражение (11) строим зависимость, изображенную на рис. 7.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изменение толщины стенки волновода при динамическом нагружении практически не влияет на его НДС. Уменьшение толщины стенки волновода в 10 раз при квазистатическом нагружении и вынужденных поперечных колебаниях приводит даже к снижению нормальных напряжений изгиба в 1,33 раза.

Но следует отметить, что необоснованное уменьшение толщины стенки может привести к нежелательному эффекту деформирования с локальной потерей устойчивости стенок 1–4 и изменению формы ПС волновода (см. рис. 2, б) [30]. В этих случаях необходимо переходить ко второму этапу расчета по предлагаемой методике, моделируя волновод оболочечной или даже твердотельной моделью.

Для решения такой задачи рекомендуется рациональное применение численных методов, например метода конечных элементов в программных комплексах ANSYS, Nastran и др. [15]. Второй этап позволяет выделить локальные области для уточненного расчета [31] с использованием разработанных программ для ЭВМ.

Двухэтапная методика расчета дает возможность исследовать НДС волнопроводов в целом и оперативно оценивать воздействие на НДС различных геометрических, физических и силовых факторов.

Совместное рассмотрение задач о деформации ПС в локальных зонах волновода в дальнейшем позволит выявить их влияние на изменения электромагнитных полей с образованием нежелательных паразитных волн. Решение этих

связанных задач улучшит качество радиотехнических параметров волноводов и обеспечит их прочность и жесткость при уменьшенных массогабаритных параметрах.

Выводы

1. Разработаны методы расчета протяженных ВРС на воздействие любых статических и динамических нагрузок, реализованные в программном обеспечении, позволяющем оперативно исследовать, выявлять и оценивать НДС ВРС на этапах проектирования при заданных нагрузках и условиях закрепления.

2. Проведено исследование влияния толщины стенки на НДС волновода, которое показало работоспособность и эффективность использования разработанной двухэтапной методики расчета.

3. На основании результатов исследования можно считать, что при статическом нагружении напряжения и деформации волновода обратно пропорциональны толщине его стенки, а при динамическом нагружении этой зависимостью можно пренебречь.

4. Использование разработанной методики при проектировании ВРС космических аппаратов серий «ГЛОНАСС» и «Луч» позволило обосновать уменьшение толщины стенки волноводов до 0,6...0,8 мм с выполнением требований по прочности и жесткости. При этом снижение массы ВРС составило 20...25 %.

5. Результаты исследований внедрены в АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» при проектировании крупногабаритных ВРС космических аппаратов серий «ГЛОНАСС», «Экспресс», «Луч» и др.

Литература

- [1] Sil'chenko P.N., Mikhnev M.M., Ankudinov A.V., Kudryavtsev I.V. Ensuring the strength and accuracy of large-size waveguide distribution systems of communication satellites. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 91–95, doi: 10.3103/S1052618811060173
- [2] ГОСТ Р 20900–2014. *Трубы волноводные медные и латунные прямоугольные. Технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2015. 14 с.
- [3] Феодосьев В.И. *Сопrotивление материалов*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 543 с.
- [4] Дарков А.В., Шапошников Н.Н. *Строительная механика*. Санкт-Петербург, Лань, 2005. 656 с.
- [5] Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. *Линейная теория тонких оболочек*. Санкт-Петербург, Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2010. 380 с.
- [6] Мяченков В.И., Григорьев И.В. *Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ*. Москва, Машиностроение, 1981. 216 с.
- [7] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. Москва, Наука, 1975. 576 с.
- [8] Снеддон И.Н., Берри Д.С. *Классическая теория упругости*. Москва, Вузовская книга, 2008. 216 с.
- [9] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Наговицин В.Н. Методика расчета напряженно-деформационного состояния волноводно-распределительных систем космических аппаратов. *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии*, 2012, № 2, с. 150–161.
- [10] Polyanin A.D., Nazaikinskii V.E. *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists*. Boca Raton–London, CRC Press, 2016. 1632 p.
- [11] Полянин А.Д., Зайцев В.Ф., Журов А.И. *Методы решения нелинейных уравнений математической физики и механики*. Москва, Физматлит, 2005. 256 с.
- [12] Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. *Пластинки и оболочки*. Москва, URSS, 2009. 635 с.
- [13] Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф. *Численный анализ элементов конструкций машин и приборов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 479 с.
- [14] Галанин М.П. *Методы численного анализа математических моделей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 591 с.
- [15] Hartmann F., Katz C. *Structural Analysis with Finite Elements*. Berlin, Springer, 2004. 484 p.

- [16] Ern A., Guermond J.L. *Theory and Practice of Finite Elements (Applied Mathematical Sciences)*. Berlin, Springer, 2004. 526 p.
- [17] Solin P. *Partial Differential Equations and the Finite Element Method*. New Jersey, Wiley-Interscience, 2005. 504 p.
- [18] ГОСТ РВ 20.57.305–98. *Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие механических факторов*. Москва, Изд-во стандартов, 2001. 54 с.
- [19] Кудрявцев И.В., Сильченко П.Н., Михнёв М.М., Гоцелюк О.Б. Сравнительная оценка решений системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба прямых участков волноводов космических аппаратов связи. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 1, с. 4–23, doi: 10.18698/0236-3941-2017-1-4-23
- [20] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин Н.В., Гоцелюк О.Б., Барыкин Е.С. *Статический анализ прочностных параметров складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661200, 2012.
- [21] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н., Синьковский Ф.К. *Квазистатический анализ складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661201, 2012.
- [22] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н. *Модальный анализ складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661204, 2012.
- [23] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнев М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н., Гоцелюк О.Б. *Анализ вынужденных колебаний складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661199, 2012.
- [24] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Синьковский Ф.К. *Термоупругий анализ прямых элементов складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661202, 2012.
- [25] Тестоедов Н.А., Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Халиманович В.И., Наговицин В.Н., Синьковский Ф.К. *Термоупругий анализ криволинейных элементов складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661203, 2012.
- [26] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Наговицин В.Н., Гоцелюк О.Б. *Модуль экспорта локального участка стержневой модели складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением в твердотельную модель Nastran*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661197, 2012.
- [27] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Наговицин В.Н., Гоцелюк О.Б. *Модуль экспорта локальной области складчатых тонкостенных оболочечных конструкций волноводов с замкнутым поперечным сечением из стержневой модели в твердотельную модель Ansys*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661198, 2012.
- [28] Писаренко Г.С. *Справочник по сопротивлению материалов*. Киев, Наукова думка, 1988. 736 с.
- [29] Горшков А.Г. *Сопротивление материалов*. Москва, Физматлит, 2005. 544 с.
- [30] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Гоцелюк О.Б. Уточненное решение системы дифференциальных уравнений в задаче изгиба оболочечных конструкций волноводов сечения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2017, № 5(116), с. 4–21, doi: 10.18698/0236-3941-2017-5-4-21

- [31] Сильченко П.Н., Кудрявцев И.В., Гоцелюк О.Б., Новиков Е.С. Способ расчета протяженных тонкостенных конструкций с неосесимметричным поперечным сечением. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11, с. 724–747, doi: 10.7463/1114.0737276

References

- [1] Sil'chenko P.N., Mikhnev M.M., Ankudinov A.V., Kudryavtsev I.V. Ensuring the strength and accuracy of large-size waveguide distribution systems of communication satellites. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, vol. 41, no. 1, pp. 91–95, doi: 10.3103/S1052618811060173
- [2] GOST P 20900–2014. *Truby volnovodnyye mednyye i latunnyye pryamougol'nyye. Tekhnicheskkiye usloviya* [State Standard R 20900–2014. Copper tubing for waveguides and brass right angle tubes. Specifications]. Moscow, Standartinform publ., 2015. 14 p.
- [3] Feodos'yev V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, Bauman Press, 2016. 543 p.
- [4] Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika* [Structural mechanics]. Sankt-Petersburg, Lan' publ., 2005. 656 p.
- [5] Novozhilov V.V., Chernykh K.F., Mikhaylovskiy E.I. *Lineynaya teoriya tonkikh obolochek* [Linear theory of thin shells]. Sankt-Petersburg, SPBU publ., 2010. 380 p.
- [6] Myachenkov V.I., Grigor'yev I.V. *Raschet sostavnykh obolocheknykh konstruksiy na EVM* [Calculation of composite shell structures on a computer]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1981. 216 p.
- [7] Timoshenko S.P., Gud'yer Dzh. *Teoriya uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow, Nauka publ., 1975. 576 p.
- [8] Sneddon I.N., Berri D.S. *Klassicheskaya teoriya uprugosti* [Classical theory of elasticity]. Moscow, Vuzovskaya kniga publ., 2008. 216 p.
- [9] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Nagovitsin V.N. Method of Stress-Deformation Distribution Computation for Waveguide Spacecraft Systems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2012, no. 2, pp. 150–161 (in Russ.).
- [10] Polyanin A.D., Nazaikinskii V.E. *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists*. Boca Raton–London, CRC Press, 2016. 1632 p.
- [11] Polyanin A.D., Zaytsev V.F., Zhurov A.I. *Metody resheniya nelineynykh uravneniy matematicheskoy fiziki i mekhaniki* [Methods for solving nonlinear equations of mathematical physics and mechanics]. Moscow, Fizmatlit publ., 2005. 256 p.
- [12] Timoshenko S. P., Voynovskiy-Kruger S. *Plastinki i obolochki* [Plates and shells]. Moscow, URSS publ., 2009. 635 p.
- [13] Gavryushin S.S., Baryshnikova O.O., Boriskin O.F. *Chislennyy analiz elementov konstruksiy mashin i priborov* [Numerical analysis of structural elements of machines and devices]. Moscow, Bauman Press, 2014. 479 p.
- [14] Galanin M.P. *Metody chislennogo analiza matematicheskikh modeley* [Methods of numerical analysis of mathematical models]. Moscow, Bauman Press, 2012. 591 p.
- [15] Hartmann F., Katz C. *Structural Analysis with Finite Elements*. Berlin, Springer, 2004. 484 p.
- [16] Ern A., Guermond J.L. *Theory and Practice of Finite Elements (Applied Mathematical Sciences)*. Berlin, Springer, 2004. 526 p.
- [17] Solin P. *Partial Differential Equations and the Finite Element Method*. New Jersey, Wiley-Interscience, 2005. 504 p.
- [18] GOST RV 20.57.305–98. *Kompleksnaya sistema kontrolya kachestva. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovaniye voyennogo naznacheniya. Metody ispytaniy na vozdeystviye mekhanicheskikh faktorov* [State Standard RV 20.57.305–98. Integrated quality control system. Apparatus, instruments, devices and equipment for military use. Mechanical Test Methods]. Moscow, Standartinform publ., 2001. 54 p.
- [19] Kudryavtsev I.V., Sil'chenko P.N., Mikhnev M.M., Gotselyuk O.B. Comparative Evaluation of Differential Equation Solutions in the Problem of Waveguide Straight Sections Bend in Communication Spacecraft. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Se-*

- ries Mechanical Engineering*, 2017, no. 1, pp. 4–23 (in Russ.), doi: 10.18698/0236-3941-2017-1-4-23
- [20] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin N.V., Gotselyuk O.B., Barykin E.S. *Sticheskiy analiz prochnostnykh parametrov skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Static analysis of the strength parameters of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2012661200, 2012.
- [21] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N., Sin'kovskiy F.K. *Kvazistaticheskiy analiz skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov* [Quasistatic analysis of folded thin-walled cladding designs of waveguides]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661201, 2012.
- [22] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N. *Modal'nyy analiz skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Modal analysis of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661204, 2012.
- [23] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N., Gotselyuk O.B. *Analiz vynuuzhdennykh kolebaniy skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Analysis of forced vibrations of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661199, 2012.
- [24] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Sin'kovskiy F.K. *Termouprugiy analiz pryamykh elementov skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Thermoelastic analysis of the direct elements of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661202, 2012.
- [25] Testoyedov N.A., Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Khalimanovich V.I., Nagovitsin V.N., Sin'kovskiy F.K. *Termouprugiy analiz krivolineynykh elementov skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem* [Thermoelastic analysis of curved elements of folded thin-walled cladding structures of waveguides with a closed cross section]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2012661203, 2012.
- [26] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Nagovitsin V.N., Gotselyuk O.B. *Modul' eksporta lokal'nogo uchastka sterzhnevoy modeli skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem v tverdotel'nyuyu model' Nastran* [The module for exporting the local section of the core model of folded thin-walled cladding structures of closed-section waveguides into the Nastran solid-state model]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661197, 2012.
- [27] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Nagovitsin V.N., Gotselyuk O.B. *Modul' eksporta lokal'noy oblasti skladchatykh tonkostennykh obolochechnykh konstruksiy volnovodov s zamknutym poperechnym secheniyem iz sterzhnevoy modeli v tverdotel'nyuyu model' Ansys* [The module for exporting the local region of folded thin-walled cladding designs of waveguides with a closed cross section from the rod model to the Ansys solid-state model]. Certificate of state registration of a computer program no. 2012661198, 2012.
- [28] Pisarenko G.S. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Material Resistance Reference]. Kiev, Naukova dumka publ., 1988. 736 p.
- [29] Gorshkov A.G. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, FIZMATLIT publ., 2005. 544 p.
- [30] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Gotselyuk O.B. A Refined Solution to the System of Differential Equations in the Problem of Bending in Thin-Shell Waveguide Structures. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2017, no. 5(116), pp. 4–21 (in Russ.), doi: 10.18698/0236-3941-2017-5-4-21

- [31] Sil'chenko P.N., Kudryavtsev I.V., Gotselyuk O.B., Novikov E.S. Method of Analysis of Extended Thin-Walled Constructions with not Axisymmetric Cross Section. *Science and Education of BMSTU*, 2014, no. 11, pp. 724–747, doi: 10.7463/1114.0737276

Статья поступила в редакцию 10.12.2019

Информация об авторах

КУДРЯВЦЕВ Илья Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика». Сибирский федеральный университет (660041, Красноярск, Российская Федерация, Свободный пр-т, д. 79, e-mail: ikudryavtsev@sfu-kras.ru).

МИХНЁВ Михаил Михайлович — кандидат технических наук, главный технолог. АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (662972, Красноярский край, Железногорск, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 52, e-mail: mix@iss-reshetnev.ru).

СИЛЬЧЕНКО Петр Никифорович — доктор технических наук, профессор кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств». Сибирский федеральный университет (660041, Красноярск, Российская Федерация, Свободный пр-т, д. 79, e-mail: psilchenko@sfu-kras.ru).

Information about the authors

KUDRYAVTSEV Ilya Vladimirovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Applied Mechanics. Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodniy Ave., Bldg. 79, e-mail: ikudryavtsev@sfu-kras.ru).

MIKHNEV Mikhail Mikhailovich — Candidate of Science (Eng.), Chief Technologist. AO Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev (662972, Krasnoyarsk region, Zheleznogorsk, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 52, e-mail: mix@iss-reshetnev.ru).

SILCHENKO Petr Nikiforovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Design and Technological Support of Engineering Industries. Siberian Federal University (660041, Krasnoyarsk, Russian Federation, Svobodniy Ave., Bldg. 79, e-mail: psilchenko@sfu-kras.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кудрявцев И.В., Михнёв М.М., Сильченко П.Н. Методика расчета на прочность волноводов для обеспечения улучшенных массогабаритных параметров. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2020, № 5, с. 50–61, doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-50-61

Please cite this article in English as:

Kudryavtsev I.V., Mikhnev M.M., Silchenko P.N. A Calculation Procedure for Strength Analysis of Wave Guides for Ensuring Improved Mass-Dimensional Parameters. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2020, no. 5, pp. 50–61, doi: 10.18698/0536-1044-2020-5-50-61