

**РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АПК
БУНКЕРНОГО ТИПА**

**CALCULATION OF THE STRENGTH OF SHELL STRUCTURES
OF AGROINDUSTRIAL COMPLEX OF BUNKER TYPE**

Ю.В. Клочков¹, доктор технических наук, профессор
А.П. Николаев¹, доктор технических наук, профессор
С.Д. Фомин¹, доктор технических наук, доцент
Т.А. Соболевская¹, кандидат технических наук
А.С. Андреев¹, аспирант, ассистент

Yu.V. Klochkov¹, A.P. Nikolaev¹, S.D. Fomin¹, T.A. Sobolevskaya¹, A.S. Andreev¹

¹*Волгоградский государственный аграрный университет*

¹*Volgograd State Agrarian University*

Дата поступления в редакцию 11.02.2019
Received 11.02.2019

Дата принятия к печати 11.05.2019
Submitted 11.05.2019

Тонкостенные элементы получили широкое распространение в инженерных конструкциях агропромышленного комплекса (АПК). Они являются конструктивными элементами зерноочистительных агрегатов, бункерных сооружений различного назначения, а также трубопроводных систем. Поэтому разработка современных численных алгоритмов прочностных расчётов конструкции бункерного типа является актуальной задачей. В настоящей статье разработан алгоритм расчёта прочности тонкостенной инженерной конструкции бункерного типа как структуры, состоящей из двух типов оболочек: цилиндрической и конической. Для определения напряженно-деформированного состояния такого агрегата использован численный метод конечных элементов с принятием разработанного авторами криволинейного конечного элемента в виде четырёхугольного фрагмента срединной поверхности оболочки с узловыми неизвестными в виде перемещений и их первых производных. Матрица жесткости используемого конечного элемента разработана на основе теории тонких оболочек с привлечением гипотезы прямой нормали. В узлах на границе сочленения цилиндрической и конической оболочек за основные неизвестные приняты кинематические параметры цилиндрической оболочки. Для получения выражений узловых параметров конической оболочки через основные узловые неизвестные цилиндрической оболочки использованы кинематические условия и уравнения равновесия статики. Полученные соотношения реализованы в матричном виде и использованы в преобразовании матриц жесткостей и векторов узловых нагрузок конечных элементов конической оболочки, примыкающих к границе сочленения с оболочкой цилиндрической. На примере расчёта прочности тонкостенной конструкции бункерного типа, состоящей из цилиндра и усеченного конуса, показана эффективность разработанных алгоритмов и подтверждена корректность полученных численных значений показателей прочности. Анализ численных результатов позволил сделать вывод о том, что коэффициент концентрации напряжений в зоне сочленения цилиндра с конусом увеличивается пропорционально углу наклона образующей конуса к его оси.

Thin-walled elements are widely used in engineering structures of agriculture (agribusiness). They are structural elements of grain cleaning units, bunker structures for various purposes, as well as pipeline systems. Therefore, the development of modern numerical algorithms for strength calculations of the bunker type structure is an urgent task. In this article, an algorithm for calculating the strength of the thin-walled engineering structure of the bunker type as a structure consisting of two types of shells: cylindrical and conical. To determine the stress-strain state of such an aggregate, a numerical finite element method is used with the adoption of a curvilinear finite element developed by the authors in the form of a quadrangular fragment of the middle surface of the shell with nodal unknowns in the form of displacements and their first derivatives. The stiffness matrix of the used finite element is developed on the basis of the theory of thin shells with the use of the direct normal hypothesis. The kinematic parameters of the cylindrical shell are taken as the main unknown in the nodes at the junction of the cylindrical and conical shells. To obtain

the expressions of the nodal parameters of a conical shell using the basic nodal unknown of the cylindrical shell used the kinematic conditions and the equilibrium equations of statics. The obtained relations are implemented in the matrix form and used in the transformation of stiffness matrices and vectors of nodal loads of finite elements of the conical shell adjacent to the boundary of the joint with the cylindrical shell. On the example of calculating the strength of a thin-walled bunker-type structure consisting of a cylinder and a truncated cone, the efficiency of the developed algorithms is shown and the correctness of the obtained numerical values of strength indicators is confirmed. The analysis of the numerical results allowed us to conclude that the stress concentration coefficient in the zone of joint of the cylinder with the cone increases proportionally to the angle of inclination of the cone to its axis.

Ключевые слова: тонкостенная конструкция бункерного типа, конечный элемент, условия сочленения цилиндра с конусом, концентрация напряжений.

Key words: the thin-walled design of the hopper type, the final element, the conditions of the joint of the cylinder with the cone, the stress concentration.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 18-41-343003 р_мол_а

Цитирование. Клочков Ю.В., Николаев А.П., Фомин С.Д., Соболевская Т.А., Андреев А.С. Расчет прочности оболочечных конструкций АПК бункерного типа. *Известия НВ АУК*. 2019. 2(54). 285-297. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-34.

Citation. Klochkov J. V., Nikolaev A. P., Fomin S. D., Sobolevskaya T. A., Andreev A. S. Calculation of strength of shell structures of AIC bunker type. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2019. 2(54). 285-297. (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-34.

Введение. Неотъемлемой частью многих инженерно-технических объектов агропромышленного комплекса (АПК) являются тонкостенные конструкции бункерного типа, представляющие собой цилиндрические оболочки, сочлененные с конусом, такие как зерноочистительные агрегаты типа ЗАВ – 40, зерносушительные комплексы, силосы для хранения комбикормов, зерновых и масличных культур и другие. Расчёты на прочность и устойчивость таких объектов аналитическими методами достаточно трудоёмки и возможны лишь для сравнительно узкого класса задач. Поэтому в настоящее время применяют в основном численные методы расчёта [20, 21, 6, 5, 8, 3, 13], подразумевающие применение современной вычислительной техники и программного обеспечения. Наибольшую популярность среди численных методов сейчас имеет метод конечных элементов (МКЭ) в различных формулировках [1, 2, 7, 4, 9-12, 14-19, 22]. Современному инженеру предлагается достаточно широкий выбор вычислительных комплексов, многие из которых имеют иностранное происхождение. Однако большинство таких комплексов являются весьма дорогостоящими, а в сопроводительной документации ответственность за те или иные инженерные решения, принятые на основе результатов использования данных комплексов, целиком перекладывается на пользователя. Поэтому актуальной остаётся задача создания отечественных компактных программных модулей по конечно-элементному расчёту тонкостенных конструкций АПК бункерного типа в виде цилиндрической оболочки, сочленённой с усечённым конусом.

Материалы и методы. Применялись численные методы расчёта с использованием современной вычислительной техники и программного обеспечения. Использовался наиболее популярный среди численных методов – метод конечных элементов (МКЭ).

Результаты и обсуждение. Геометрия тонкостенной конструкции бункерного типа. Тонкостенная конструкция АПК бункерного типа представляет собой цилиндр, сочленённый с усечённым конусом. Срединная поверхность бункера описывается радиус-векторами:

– для цилиндрической части:

$$\vec{R}^0 = x\vec{i} + R\sin\theta\vec{j} + R\cos\theta\vec{k} \quad (1)$$

– для конической части:

$$\vec{R}^0 = (L_c + x)\vec{i} + r(x)\sin\theta\vec{j} + r(x)\cos\theta\vec{k}, \quad (2)$$

где R – радиус цилиндра, θ – угол, отсчитываемый от оси Oz против хода часовой стрелки в плоскости, перпендикулярной оси Ox ; L_c – длина образующей цилиндра.

Входящая в (2) функция $r(x)$ представляет собой радиус вращения конуса:

$$r(x) = R - xtga, \quad (3)$$

где α – угол наклона образующей конуса к оси Ox .

Вычисляя частные производные от (1) и (2) по x и θ , можно найти векторы локального базиса для цилиндра:

$$\begin{aligned} \vec{a}_1^0 &= \vec{R}_{,x}^0 = \vec{i}; \quad \vec{a}_2^0 = \vec{R}_{,\theta}^0 = R\cos\theta\vec{j} - R\sin\theta\vec{k}; \\ \vec{a}^0 &= \vec{a}_1^0 \times \vec{a}_2^0 / |\vec{a}_1^0 \times \vec{a}_2^0| = \sin\theta\vec{j} + \cos\theta\vec{k} \end{aligned} \quad (4)$$

и конуса

$$\begin{aligned} \vec{a}'_1 &= \vec{i} + r_{,x}\sin\theta\vec{j} + r_{,x}\cos\theta\vec{k}; \quad \vec{a}'_2 = r(x)\sin\theta\vec{j} + r_{,x}\cos\theta\vec{k}; \\ \vec{a}' &= (-r(x) \cdot r_{,x}\vec{i} + r(x)\sin\theta\vec{j} + r(x)\cos\theta\vec{k}) / (r(x)\sqrt{1+r_{,x}^2}), \end{aligned} \quad (5)$$

где $r_{,x} = -tga$.

Соотношения (4), (5) могут быть представлены в матричной форме:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \vec{a}^0 \\ \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} C^0 \\ K^0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{i} \end{Bmatrix}; \quad \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C^0 \\ K^0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \vec{a}^0 \\ \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix}, \\ \begin{matrix} 3 \times 1 & 3 \times 3 & 3 \times 1 & 3 \times 1 & 3 \times 3 & 3 \times 1 \\ 3 \times 1 & 3 \times 3 & 3 \times 1 & 3 \times 1 & 3 \times 3 & 3 \times 1 \end{matrix} & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } \begin{Bmatrix} \vec{a}^0 \\ \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix}^T = \begin{Bmatrix} \vec{a}_1^0 \vec{a}_2^0 \vec{a}^0 \\ \vec{a}_1^{0'} \vec{a}_2^{0'} \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix}; \quad \begin{Bmatrix} \vec{i} \\ \vec{i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \vec{i} \vec{j} \vec{k} \\ \vec{i} \vec{j} \vec{k} \end{Bmatrix}; \quad \begin{Bmatrix} \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix}^T = \begin{Bmatrix} \vec{a}_1^{0'} \vec{a}_2^{0'} \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix}.$$

На основании (6) можно установить матричную зависимость между векторами локальных базисов цилиндра и конуса:

$$\begin{Bmatrix} \vec{a}^0 \\ \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C^0 \\ K^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C^0 \\ K^0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \vec{a}^{0'} \\ \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} d^0 \\ d^0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{a}^{0'} \\ \vec{a}^{0'} \end{Bmatrix}. \quad (7)$$

Дифференцированием (4) и (5) можно найти производные векторов локального базиса:

$$\begin{aligned} \vec{a}_{1,x}^0 &= 0; \quad \vec{a}_{2,x}^0 = 0; \quad \vec{a}_x^0 = 0; \\ \vec{a}_{1,\theta}^0 &= 0; \quad \vec{a}_{2,\theta}^0 = -R\sin\theta\vec{j} - R\cos\theta\vec{k}; \quad \vec{a}_\theta^0 = \cos\theta\vec{j} - \sin\theta\vec{k}; \\ \vec{a}'_{1,x} &= 0; \quad \vec{a}'_{2,x} = r_{,x}\cos\theta\vec{j} - r_{,x}\sin\theta\vec{k}; \\ \vec{a}'_x &= \left((-r_{,x}^2)\vec{i} + r_{,x}\sin\theta\vec{j} + r_{,x}\cos\theta\vec{k} \right) / \left(r(x)\sqrt{1+r_{,x}^2} \right) + \\ &+ \left(-r(x)r_{,x}\vec{i} + r(x)\sin\theta\vec{j} + r(x)\cos\theta\vec{k} \right) \cdot \left(\frac{-r_{,x}}{(r(x))^2\sqrt{1+r_{,x}^2}} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\vec{a}_{1,\theta}^{0'} = r_{,\theta} \cos\theta \vec{j} - r_{,\theta} \sin\theta \vec{k}; \quad \vec{a}_{2,\theta}^{0'} = -r(x) \sin\theta \vec{j} - r(x) \cos\theta \vec{k};$$

$$\vec{a}_{,\theta}^{0'} = (r(x) \cos\theta \vec{j} - r(x) \sin\theta \vec{k}) / (r(x) \sqrt{1 + r_{,x}^2}).$$

Соотношения (8), (9) могут быть представлены в матричном виде:

$$\{\vec{a}_{,x}^0\} = [0]\{\vec{i}\}; \quad \{\vec{a}_{,\theta}^0\} = [C_{,\theta}^0]\{\vec{i}\};$$

$$\{\vec{a}_{,x}^{0'}\} = [K_{,x}^0]\{\vec{i}\}; \quad \{\vec{a}_{,\theta}^{0'}\} = [K_{,\theta}^0]\{\vec{i}\},$$

или с учётом (6):

$$\{\vec{a}_{,\theta}^0\} = [C_{,\theta}^0][C^0]^{-1}\{\vec{a}^0\} = \{\mu\}\{\vec{a}^0\}; \quad \{\vec{a}_{,x}^{0'}\} = [K_{,x}^0][K^0]^{-1}\{\vec{a}^{0'}\} = \{\nu\}\{\vec{a}^{0'}\};$$

$$\{\vec{a}_{,\theta}^{0'}\} = [K_{,\theta}^0][K^0]^{-1}\{\vec{a}^0\} = \{w\}\{\vec{a}^0\}, \quad (10)$$

где $\{\vec{a}_{,x}^0\}^T = \{\vec{a}_{1,x}^0 \vec{a}_{2,x}^0 \vec{a}_{,x}^0\}$; $\{\vec{a}_{,\theta}^0\}^T = \{\vec{a}_{1,\theta}^0 \vec{a}_{2,\theta}^0 \vec{a}_{,\theta}^0\}$; $\{\vec{a}_{,x}^{0'}\}^T = \{\vec{a}_{1,x}^{0'} \vec{a}_{2,x}^{0'} \vec{a}_{,x}^{0'}\}$; $\{\vec{a}_{,\theta}^{0'}\}^T = \{\vec{a}_{1,\theta}^{0'} \vec{a}_{2,\theta}^{0'} \vec{a}_{,\theta}^{0'}\}$.

При деформировании конструкции бункерного типа точка её срединной поверхности A^0 переместится в точку А. Вектор перемещения данной точки и его производные по x и θ записываются в локальном базисе точки A^0 :

$$\vec{v} = u\vec{a}_1^0 + v\vec{a}_2^0 + w\vec{a}^0; \quad \vec{v}_{,x} = t_x^1\vec{a}_1^0 + t_x^2\vec{a}_2^0 + t_x\vec{a}^0;$$

$$\vec{v}_{,\theta} = t_\theta^1\vec{a}_1^0 + t_\theta^2\vec{a}_2^0 + t_\theta\vec{a}^0, \quad (11)$$

где u, v, w – меридиональная, кольцевая и нормальная компоненты вектора перемещения, $t_x^1, t_x^2, t_x, t_\theta^1, t_\theta^2, t_\theta$ – компоненты производных векторов перемещений.

При получении соотношений между деформациями и перемещениями и их производными при расчёте тонкостенных конструкций, к которым относятся оболочечные конструкции бункерного типа, используют гипотезу о прямой нормали (Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. 2010):

$$\vec{v} + \zeta\vec{a} = \vec{V} + \zeta\vec{a}^0,$$

Откуда

$$\vec{V} = \vec{v} + \zeta(\vec{a} - \vec{a}^0), \quad (12)$$

где \vec{V} – вектор перемещения точки, расположенной во внутреннем слое бункерной конструкции на расстоянии ζ от её срединной поверхности; \vec{a} – орт нормали в точке срединной поверхности в деформированном состоянии.

Ковариантные компоненты тензора деформаций могут быть определены соотношением механики сплошной среды (Седов Л. И. Механика сплошной среды, 1976):

$$\varepsilon_{\alpha\beta}^\zeta = (g_{\alpha\beta} - g_{\alpha\beta}^0)/2, \quad (13)$$

$$\text{где } g_{\alpha\beta} = \vec{g}_\alpha \cdot \vec{g}_\beta; \quad g_{\alpha\beta}^0 = \vec{g}_\alpha^0 \cdot \vec{g}_\beta^0. \quad (14)$$

Здесь и ниже греческие индексы α и β последовательно принимают значения x и θ .

Входящие в (14) векторы базиса $\vec{g}_\alpha^0, \vec{g}_\alpha$ точки, расположенной в произвольном слое бункерной конструкции, определяются дифференцированием соответствующих радиус-векторов:

$$\vec{g}_\alpha^0 = \vec{R}_{,\alpha}^{0\zeta} = (\vec{R}^0 + \zeta\vec{a}^0)_{,\alpha} = \vec{a}_\alpha^0 + \zeta\vec{a}_{,\alpha}^0; \quad (15)$$

$$\vec{g}_\alpha = \vec{R}_{,\alpha}^\zeta = (\vec{R}^{0\zeta} + \vec{V})_{,\alpha} = \vec{g}_\alpha^0 + \vec{V}_{,\alpha} = \vec{g}_\alpha^0 + t_\alpha^1\vec{a}_1^0 + t_\alpha^2\vec{a}_2^0 + t_\alpha\vec{a}^0 + \zeta(\vec{a} - \vec{a}^0)_{,\alpha}.$$

Конечный элемент оболочечной конструкции бункерного типа. Конечным элементом бункерной конструкции выбирается четырёхугольный фрагмент её срединной поверхности с узлами m, n, p, s , расположенными в углах фрагмента. С целью реализации процедуры численного интегрирования по площади четырёхугольного фрагмента по квадратуре Гаусса в конечном элементе, наряду с глобальной x, θ используется локальная система координат ξ, η , изменяющаяся в пределах от -1 до 1.

Столбец узловых неизвестных четырёхугольного фрагмента представляет собой набор, состоящий из компонент узловых векторов перемещений и их частных производных первого порядка по локальным ξ, η или глобальным x, θ координатам:

$$\{U_y^l\}_{1 \times 36}^T = \left\{ \begin{matrix} \{u_y^l\}^T & \{v_y^l\}^T & \{w_y^l\}^T \\ 1 \times 12 & 1 \times 12 & 1 \times 12 \end{matrix} \right\}; \quad (16)$$

$$\{U_y^r\}_{1 \times 36}^T = \left\{ \begin{matrix} \{u_y^r\}^T & \{v_y^r\}^T & \{w_y^r\}^T \\ 1 \times 12 & 1 \times 12 & 1 \times 12 \end{matrix} \right\}, \quad (17)$$

где $\{z_y^l\}_{1 \times 12}^T = \{z^m z^n z^p z^s z_{,\xi}^m z_{,\xi}^n z_{,\xi}^p z_{,\xi}^s z_{,\eta}^m z_{,\eta}^n z_{,\eta}^p z_{,\eta}^s\}$; $\{z_y^r\}_{1 \times 12}^T = \{z^m z^n z^p z^s z_{,x}^m z_{,x}^n z_{,x}^p z_{,x}^s z_{,\theta}^m z_{,\theta}^n z_{,\theta}^p z_{,\theta}^s\}$. Здесь под z понимается компонента вектора перемещения u, v или w .

Между (16) и (17) можно установить матричную зависимость:

$$\{U_y^l\}_{36 \times 1} = [T]_{36 \times 36} \{U_y^r\}_{36 \times 1}. \quad (18)$$

Глобальные координаты x и θ точки внутренней области четырёхугольного конечного элемента выражаются через глобальные координаты узлов посредством матричной зависимости:

$$x = \{\varphi\}_{1 \times 4}^T \{x_y\}_{4 \times 1}; \quad \theta = \{\varphi\}_{1 \times 4}^T \{\theta_y\}_{4 \times 1}, \quad (19)$$

где $\{x_y\}_{1 \times 4}^T = \{x^m x^n x^p x^s\}$; $\{\theta_y\}_{1 \times 4}^T = \{\theta^m \theta^n \theta^p \theta^s\}$; $\{\varphi\}_{1 \times 4}^T = \{\varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \varphi_4\}$ – матрица-строка, содержащая билинейные функции локальных координат:

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{(1-\xi)(1-\eta)}{2}; & \varphi_2 &= \frac{(1+\xi)(1-\eta)}{2}; \\ \varphi_3 &= \frac{(1+\xi)(1+\eta)}{2}; & \varphi_4 &= \frac{(1-\xi)(1+\eta)}{2}; \end{aligned} \quad (20)$$

Для получения элементов входящей в (18) матрицы $[T]$ необходимо найти производные (19) по ξ и η :

$$\begin{aligned} x_{,\xi} &= \{\varphi_{,\xi}\}_{1 \times 4}^T \{x_y\}_{4 \times 1}; & x_{,\eta} &= \{\varphi_{,\eta}\}_{1 \times 4}^T \{x_y\}_{4 \times 1}; \\ \theta_{,\xi} &= \{\varphi_{,\xi}\}_{1 \times 4}^T \{\theta_y\}_{4 \times 1}; & \theta_{,\eta} &= \{\varphi_{,\eta}\}_{1 \times 4}^T \{\theta_y\}_{4 \times 1}. \end{aligned} \quad (21)$$

Компонента вектора перемещения точки, принадлежащей внутренней области четырёхузловой конечного элемента, интерполируется через набор своих узловых значений и их производных посредством полиномиальных зависимостей, представляющих собой произведения Эрмитовых функций третьего порядка:

$$z = \{\psi\}_{1 \times 12}^T \{z_y^l\}_{12 \times 1}. \quad (22)$$

Выполняя операцию дифференцирования (22) по x и θ , можно получить интерполяционные выражения для производных компонент вектора перемещения первого и второго порядка:

$$z_{,\alpha} = \left(\{\psi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha} + \{\psi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha} \right) \{z_y^n\};$$

$$z_{,\alpha\beta} = (\{\psi_{,\xi\xi}\}^T \xi_{,\alpha}\xi_{,\beta} + \{\psi_{,\xi\eta}\}^T (\xi_{,\alpha}\eta_{,\beta} + \eta_{,\alpha}\xi_{,\beta}) + \{\psi_{,\eta\eta}\}^T \eta_{,\alpha}\eta_{,\beta} + \{\psi_{,\xi}\}^T \xi_{,\alpha\beta} + \{\psi_{,\eta}\}^T \eta_{,\alpha\beta}) \{z_y^n\}. \quad (23)$$

Для компоновки матрицы жесткости и столбца узловых усилий четырёхузлового конечного элемента используется функционал Лагранжа:

$$\Phi = \int_V \{\varepsilon_{\alpha\beta}^\zeta\}^T \{\sigma^{\alpha\beta}\} dV - \int_F \{U\}^T \{P\} dF, \quad (24)$$

где $\{\varepsilon_{\alpha\beta}^\zeta\}^T = \{\varepsilon_{11}^\zeta \varepsilon_{22}^\zeta 2\varepsilon_{12}^\zeta\}$; $\{\sigma^{\alpha\beta}\}^T = \{\sigma^{11} \sigma^{22} \sigma^{12}\}$ – деформации и напряжения в точке произвольного слоя оболочки; $\{U\}^T = \{u \ v \ w\}$ – компоненты вектора перемещения точки срединной поверхности оболочечной конструкции бункерного типа; $\{P\}^T = \{p_1 \ p_2 \ p_3\}$ – столбец внешней поверхностной нагрузки.

Дальнейшая процедура получения матрицы жесткости и столбца узловых усилий осуществляется по стандартному для МКЭ варианту в формулировке метода перемещений [7, 4, 9-12, 22, 17-19, 14-16].

Условия сочленения цилиндрической оболочки с усечённым конусом. Для корректного вычисления напряжений в зоне сочленения цилиндрической части с усечённым конусом бункерной конструкции необходимо предусмотреть выполнение матричных операций, позволяющих выражение узловых неизвестных усечённого конуса через узловые неизвестные цилиндрической части в узлах на окружности их пересечения. Для выполнения данной задачи были использованы следующие условия сочленения.

Равенство векторов перемещений усечённого конуса и цилиндра в узлах, расположенных на границе сочленения:

$$\vec{v}^c = \vec{v}^k \text{ или}$$

$$u\vec{a}_1^0 + v\vec{a}_2^0 + w\vec{a}^0 = u'\vec{a}_1^{0'} + v'\vec{a}_2^{0'} + w'\vec{a}^{0'}. \quad (25)$$

Принимая во внимание (7), равенство (25) можно преобразовать к виду

$$u \left(d_{11}^0 \vec{a}_1^{0'} + d_{12}^0 \vec{a}_2^{0'} + d_{13}^0 \vec{a}^{0'} \right) + v \left(d_{21}^0 \vec{a}_1^{0'} + d_{22}^0 \vec{a}_2^{0'} + d_{23}^0 \vec{a}^{0'} \right) + w \left(d_{31}^0 \vec{a}_1^{0'} + d_{32}^0 \vec{a}_2^{0'} + d_{33}^0 \vec{a}^{0'} \right) = u' \vec{a}_1^{0'} + v' \vec{a}_2^{0'} + w' \vec{a}^{0'}. \quad (26)$$

Из (26) можно получить следующие три равенства:

$$u' = u d_{11}^0 + v d_{21}^0 + w d_{31}^0; \quad v' = u d_{12}^0 + v d_{22}^0 + w d_{32}^0; \\ w' = u d_{13}^0 + v d_{23}^0 + w d_{33}^0. \quad (27)$$

Применяя к (25) операцию дифференцирования по θ , можно записать следующие выражения:

$$\vec{v}_\theta^c = \vec{v}_\theta^k \text{ или } t_\theta^1 \vec{a}_1^0 + t_\theta^2 \vec{a}_2^0 + t_\theta \vec{a}^0 = t_\theta^{1'} \vec{a}_1^{0'} + t_\theta^{2'} \vec{a}_2^{0'} + t_\theta' \vec{a}^{0'}. \quad (28)$$

Учитывая (7) из (28), можно получить ещё три равенства:

$$t_\theta^{1'} = t_\theta^1 d_{11}^0 + t_\theta^2 d_{21}^0 + t_\theta d_{31}^0; \quad t_\theta^{2'} = t_\theta^1 d_{12}^0 + t_\theta^2 d_{22}^0 + t_\theta d_{32}^0; \\ t_\theta' = t_\theta^1 d_{13}^0 + t_\theta^2 d_{23}^0 + t_\theta d_{33}^0. \quad (29)$$

Из (29) можно выразить производные компонент векторов перемещений конуса по координате θ в узлах на границе пересечения через узловые неизвестные цилиндра:

$$\begin{aligned} u'_{\theta} &= f_1(u, u_x, u_{\theta}, v, v_x, v_{\theta}, w, w_x, w_{\theta}); \\ v'_{\theta} &= f_2(u, u_x, u_{\theta}, v, v_x, v_{\theta}, w, w_x, w_{\theta}); \\ w'_{\theta} &= f_3(u, u_x, u_{\theta}, v, v_x, v_{\theta}, w, w_x, w_{\theta}). \end{aligned} \quad (30)$$

Следующим кинематическим условием сочленения цилиндрической части с усечённым конусом является предположение о равенстве угла поворота нормалей к их срединным поверхностям:

$$\begin{aligned} \vec{v}'_x \vec{a}^0 &= \vec{v}^k_x \vec{a}^{0'} \quad \text{или} \\ (t_x^1 \vec{a}_1^0 + t_x^2 \vec{a}_2^0 + t_x \vec{a}^0) \vec{a}^0 &= (t_x^{1'} \vec{a}_1^{0'} + t_x^{2'} \vec{a}_2^{0'} + t_x' \vec{a}^{0'}) \vec{a}^{0'}, \quad \text{откуда} \\ t_x &= t_x'. \end{aligned} \quad (31)$$

Из (31) можно получить выражение для производной нормальной компоненты вектора перемещения по x конуса через узловые неизвестные цилиндрической части:

$$w'_{x} = f_4(u, u_x, u_{\theta}, v, v_x, v_{\theta}, w, w_x, w_{\theta}). \quad (32)$$

Статическое условие сочленения заключается в равенстве суммы сил в узлах на окружности сочленения:

$$\begin{aligned} \vec{N}^c + \vec{N}^k &= 0 \quad \text{или} \\ N_x^1 \vec{a}_1^0 + N_x^2 \vec{a}_2^0 + N_x \vec{a}^0 &= -N_x^{1'} \vec{a}_1^{0'} - N_x^{2'} \vec{a}_2^{0'} - N_x' \vec{a}^{0'}. \end{aligned} \quad (33)$$

Из (33) можно записать равенство $N_x^2 = -N_x^{2'}$.

Из последнего равенства можно выразить производную кольцевой компоненты вектора перемещения по x конуса через узловые варьируемые параметры цилиндра:

$$v'_{x} = f_5(u, u_x, u_{\theta}, v, v_x, v_{\theta}, w, w_x, w_{\theta}). \quad (34)$$

Компонента u'_{x} в узлах на окружности сочленения остаётся свободно варьируемой.

На основании (27), (30), (32) и (34) компонуется матрицы преобразований [PR], на которые умножаются матрицы жесткости и столбцы узловых усилий четырёхузловых конечных элементов усечённого конуса, которые граничат с окружностью сочленения.

Результаты и обсуждение. Была рассчитана тонкостенная бункерная конструкция, состоящая из цилиндра и усечённого конуса, нагруженная внутренним давлением $q = 5,0$ МПа. Торце цилиндрической части был шарнирно закреплён, торце усечённого конуса был свободен от закреплений (Рис. 1). Были приняты следующие исходные данные: длина образующей цилиндрической части $L_c = 1,00$ м; радиус цилиндра $R = 0,9$ м; толщина стенок бункера $t = 0,02$ м; длина образующей конуса $L_c = 0,6$ м; угол $\alpha = \frac{\pi}{4}$ рад.

Вследствие наличия осевой симметрии бункерная конструкция моделировалась одним рядом четырёхугольных конечных элементов, ориентированным в меридиональном направлении. Результаты расчётов представлены в таблице, в которой приведены значения меридиональных σ_m и кольцевых σ_k напряжений на внутренней (σ^B), наружной (σ^H) и срединной (σ^{CP}) поверхностях в характерных сечениях бункерной конструкции в зависимости от числа конечных элементов.

Анализ табличного материала показывает устойчивую сходимость вычислительного процесса и практическое совпадение численных значений напряжений аналитическому решению, полученному из условия равновесия тонкостенной бункерной конструкции.

Координата x , м	Напряжения σ , МПа	Число конечных элементов			Аналитическое решение σ , МПа
		24	48	96	
0,0 м	σ_M^B	80,89	81,0	81,0	
	σ_M^H	81,17	81,13	81,13	
	$\sigma_K^{срeд}$	81,07	81,066	81,066	81,066
	$\sigma_K^{срeд}$	225,05	225,04	225,04	225,00
1,0 м	σ_M^B	637,06	638,03	637,51	
	σ_M^H	-473,39	-475,85	-475,38	
	σ_K^B	113,41	113,69	113,54	
	σ_K^H	-219,73	-220,47	-220,33	
1,42 м	σ_M^B	-0,13	-0,016	-0,001	0,000
	σ_M^H	0,14	0,016	0,001	0,000
	σ_K^B	165,82	165,85	165,86	
	σ_K^H	152,33	152,30	152,29	
	$\sigma_K^{срeд}$	159,08	159,08	159,07	

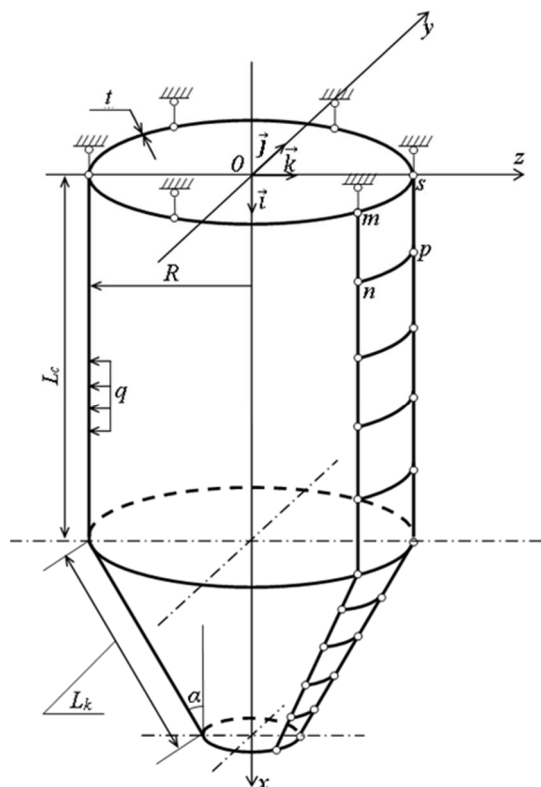


Рисунок 1 – Расчётная схема тонкостенной конструкции бункерного типа

На рисунке 2 представлены эпюры меридиональных напряжений на внутренней и наружной поверхностях бункерной конструкции. Как видно из рисунка, концентрация напряжений возникает в зоне сочленения цилиндрической части с усеченным конусом, что необходимо учитывать при выполнении прочностных расчётов бункерной конструкции.

Несомненный интерес представляет анализ влияния угла α на коэффициент концентрации напряжений в зоне сочленения цилиндрической части с усеченным конусом. На рисунке 3 представлен график изменения коэффициента концентрации напряжений K , равного отношению σ_M^B при $x = 0,0$ м к σ_K^B при $x = L_c$ в зависимости от угла α .

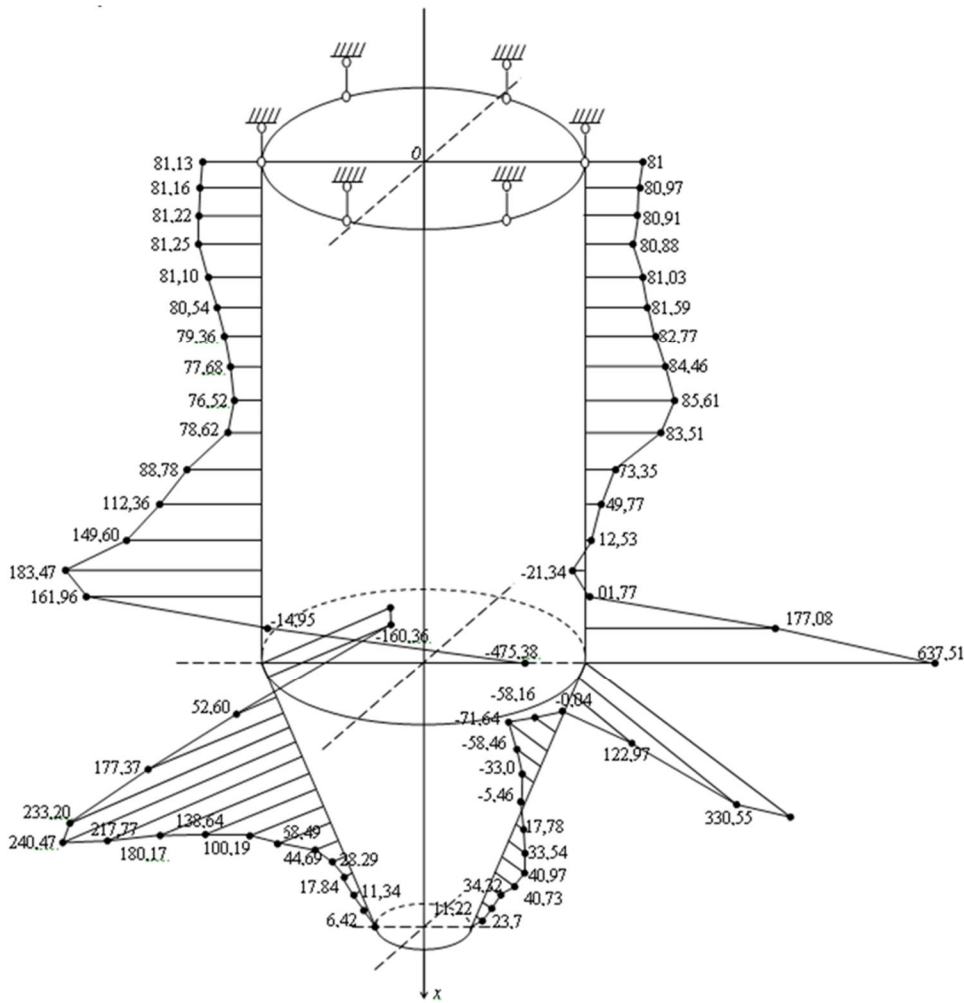


Рисунок 2 – Эпюры нормальных напряжений $\sigma_{xx}^H, \sigma_{xx}^B$, МПа

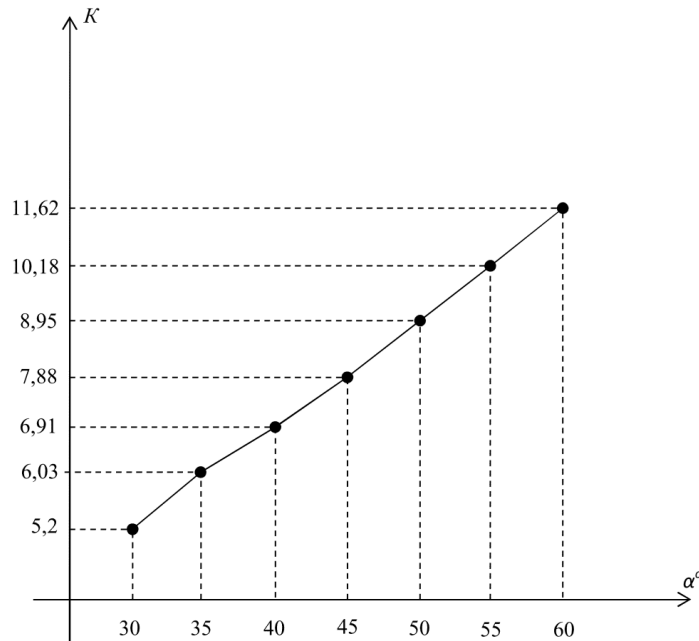


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента концентрации напряжений K от угла α

Как видно из рисунка 3, коэффициент концентрации напряжений K увеличивается с увеличением значения угла α .

Заключение. На основании анализа табличного и графического материалов можно сделать вывод о корректности разработанного алгоритма расчёта тонкостенной конструкции бункерного типа, о наличии концентрации напряжений в зоне сочленения цилиндрической части с усечённым конусом, о пропорциональности коэффициентов концентрации напряжений углу наклона образующей конуса α к оси Ox , что необходимо учитывать при выполнении прочностных расчётов конструкций бункерного типа.

Библиографический список

1. Игнатьев, А.В. Расчет тонких пластин по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода с исключением перемещений конечных элементов как жесткого целого [Текст] / А. В. Игнатьев, В. А. Игнатьев, Е.А. Гамзатова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 3 (711). – С. 5-13.
2. Игнатьев, А. В. Анализ изгибаемых пластинок с односторонними связями по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода / А. В. Игнатьев, В. А. Игнатьев, Е. А. Гамзатова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 8 (716). – С. 5-14.
3. Каюмов, Р.А. Потеря устойчивости листовых косоугольных консолей [Текст] / Р.А. Каюмов, И.З. Мухамедова, Г.Ф. Хазиева // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 3 (45). – С. 129-135.
4. Каюмов, Р. А. Моделирование процесса деформирования и оценка несущей способности системы грунт – тонкостенная конструкция [Текст]/ Р. А. Каюмов, Ф. Р. Шакирзянов, С.С. Гаврюшин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 6. – С. 20-24.
5. Ким, А.Ю. Сравнение экспериментального и численного исследования большепролетного пневматического линзообразного сооружения [Текст] / А.Ю. Ким, С.В. Полников // Научное обозрение. – 2016. – № 15. – С. 36-41.
6. Пятикрестовский, К.П. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций [Текст] / К.П. Пятикрестовский, В.И. Травуш// Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 2. – С. 115-119.
7. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к чемпионату мира по футболу 2018 года [Текст] / А. М. Белостоцкий, П. А. Акимов, А. А. Аул, Д. С. Дмитриев, Ю. Н. Дядченко, А. И. Нагибович, К. И. Островский, А. С. Павлов // Academia. Архитектура и строительство. – 2018. – № 3 – С. 118-129.
8. Хайруллин, Ф.С. Расчет тонких оболочек с использованием аппроксимирующих функций различного порядка [Текст] / Ф.С. Хайруллин, Д.Д. Мингалиев // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 14. – С. 102-104.
9. Чепурненко, А.С. Расчет цилиндрических гофрированных конструкций при помощи полуаналитического метода конечных элементов [Текст]/ А.С. Чепурненко, Б.М. Языев, М.С. Турко // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 12 (64). – С. 49-56.
10. Belostotsky, A.M. Adaptive finite-element models in structural health monitoring systems [Текст]/ А.М. Belostotsky, Р.А. Akimov, О.А. Negrozov, N.O. Petryashev, S.O. Petryashev, S.V. Sherbina, D.K. Kalichava, Т.В. Kaytukov // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 2. – С. 169-178.
11. Continuum mechanics based bilinear shear deformable shell element using absolute nodal coordinate formulation, Trans. ASME. [Текст] / Н. Yamashita, Antti I. Valkeapaa, P. Jayakumar, H. Syqiyama // J. Comput. and Nonlinear Dyn. – 2015. – Vol. 10. – № 5. – P. 051012/1-051012/9.
12. Finite element simulatio of metallic cylindrical sandwich shells with graded aluminum tabular cores subjected to internal blast loading, [Текст] / Shiqiang Li, Guoxing Lu, Zhihua Wang, Longmao Zhao, Guiying Wu // Int. J. Mech. Sci. – 2015. – № 96-97. – P. 1-12.
13. Galishnikova, V.V. Analysis of frame buckling without sidesway classification [Текст] / V.V. Galishnikova, P. Ja. Pahl // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. – Т. 14. – № 4. – С. 299-312.
14. Hanslo, P. Tangential differential calculus and the finite element modeling of a large deformation elastic membrane problem [Текст] / P. Hanslo, G. Larson Mats, F. Larson // Comput. Mech. – 2015. – Vol. 56. – № 1. – P. 87-95.

15. He, Xiaocong. Finite element analysis of torsional free vibration of adhesively bonded single-lap joints [Tekst] / He, Xiaocong // Int. J. Adhes. and Adhes. – 2014. – № 48. – P. 59-66.
16. Levyakov, S.V. Application of triangular element invariants for geometrically nonlinear analysis of functionally graded shells [Tekst] / S.V. Levyakov, V.V. Kuznetsov // Computational Mechanics. – 2011. – Vol. 48. – № 4. – P. 499-513.
17. Nguyen, Nhung. Nonlinear, finite deformation, finite element analysis, ZAMP. [Tekst] / Nhung Nguyen, Anthonym Waas // Z. Angew. math. and Phys. – 2016. – Vol. 67. – № 9. – P. 35/1-35/24.
18. Sartorato, Murilo. A finite element formulation for smart piezoelectric composite shells: Mathematical formulation, computational analysis and experimental evaluation [Tekst] / Murilo Sartorato, Ricardo de Medeiros, Volnei Tita // Compos. Struct. – 2015. – № 127. – P. 185-198.
19. Solodovnikov, A.S. Numerical study of strength properties for a composite material with short reinforcing fibers [Tekst] / A.S. Solodovnikov, S.V. Sheshenin // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2017. – Т. 72. – № 4. – P. 94-100.
20. Storozhuk, E.A. Stress Distribution Near a Circular Hole in a Flexible Orthotropic Cylindrical Shell of Elliptical Cross-Section [Tekst] / E.A. Storozhuk, S.M. Komarchuk // International Applied Mechanics. – 2018. – № 54(6). – С. 687-694.
21. Storozhuk, E.A. Stress-Strain State Near a Hole in a Shear-Compliant Composite Cylindrical Shell with Elliptical Cross-Section [Tekst] / E.A. Storozhuk, I.S. Chernyshenko, A.V. Yatsura // International Applied Mechanics. – 2018. – № 54(5). – С. 559-567.
22. Zhelezov, L.P. Nonlinear deformation and stability of discretely reinforced elliptical cylindrical shells under transverse bending and internal pressure [Tekst] / L.P. Zhelezov, V.V. Kabanov, D.V. Boiko // Russian Aeronautics. – 2014. – Т. 57. – № 2. – P. 118-126.

References

1. Ignat'ev, A. V. Raschet tonkih plastin po metodu konechnykh jelementov v forme klassicheskogo smeshannogo metoda s isklucheniem peremeschenij konechnykh jelementov kak zhestkogo celogo [Tekst] / A. V. Ignat'ev, V. A. Ignat'ev, E. A. Gamzatova // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo. - 2018. - № 3 (711). - P. 5-13.
2. Ignat'ev, A. V. Analiz izgibaemykh plastinok s odnostoronnimi svyazyami po metodu konechnykh jelementov v forme klassicheskogo smeshannogo metoda / A. V. Ignat'ev, V. A. Ignat'ev, E. A. Gamzatova // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo. - 2018. - № 8 (716). - P. 5-14.
3. Kayumov, R. A. Poterya ustojchivosti listovykh kosougol'nykh konsol'ej [Tekst] / R. A. Kayumov, I. Z. Muhamedova, G. F. Hazieva // Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. - 2018. - № 3 (45). - P. 129-135.
4. Kayumov, R. A. Modelirovanie processa deformirovaniya i ocenka nesuschej sposobnosti sistemy grunt - tonkostennaya konstrukciya [Tekst] / R. A. Kayumov, F. R. Shakirzyanov, S. S. Gavryushin // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Mashinostroenie. - 2014. - № 6. - P. 20-24.
5. Kim, A. Yu. Sravnenie jeksperimental'nogo i chislennogo issledovaniya bol'sheproletnogo pnevmaticheskogo linzobraznogo sooruzheniya [Tekst] / A. Yu. Kim, S. V. Polnikov // Nauchnoe obozrenie. - 2016. - № 15. - P. 36-41.
6. Pyatikrestovskij, K. P. O programmirovanii nelinejnogo metoda rascheta derevyannykh konstrukcij [Tekst] / K. P. Pyatikrestovskij, V. I. Travush // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. - 2015. - № 2. - P. 115-119.
7. Raschetnoe obosnovanie mehanicheskoy bezopasnosti stadionov k chempionatu mira po futbolu 2018 goda [Tekst] / A. M. Belostockij, P. A. Akimov, A. A. Aul, D. S. Dmitriev, Yu. N. Dyadchenko, A. I. Nagibovich, K. I. Ostrovskij, A. S. Pavlov // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. - 2018. - № 3 - P. 118-129.
8. Hajrullin, F. S. Raschet tonkih obolochek s ispol'zovaniem approksimiruyuschieh funkcij razlichnogo poryadka [Tekst] / F. S. Hajrullin, D. D. Mingaliev // Vestnik Tehnologicheskogo universiteta. - 2017. - Т. 20. - № 14. - P. 102-104.
9. Chepurnenko, A. S. Raschet cilindricheskikh gofirovannykh konstrukcij pri pomoschi poluanaliticheskogo metoda konechnykh jelementov [Tekst] / A. S. Chepurnenko, B. M. Yazyev, M. S. Turko // Stroitel'stvo i tehnogennaya bezopasnost'. - 2018. - № 12 (64). - P. 49-56.

10. Belostotsky, A.M. Adaptive finite-element models in structural health monitoring systems [Текст] / A.M. Belostotsky, P.A. Akimov, O.A. Negrozov, N.O. Petryashev, S.O. Petryashev, S.V. Sherbina, D.K. Kalichava, T.B. Kaytukov // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 2. – P. 169-178.
11. Continuum mechanics based bilinear shear deformable shell element using absolute nodal coordinate formulation, Trans. ASME. [Текст] / H. Yamashita, Antti I. Valkeapaa, P. Jayakumar, H. Syqiyama // J. Comput. and Nonlinear Dyn. – 2015. – Vol. 10. – № 5. – P. 051012/1-051012/9.
12. Finite element simulatio of metallic cylindrical sandwich shells with graded aluminum tabular cores subjected to internal blast loading, [Текст] / Shiqiang Li, Guoxing Lu, Zhihua Wang, Longmao Zhao, Guiying Wu // Int. J. Mech. Sci. – 2015. – № 96-97. – P. 1-12.
13. Galishnikova, V.V. Analysis of frame buckling without sidesway classification [Текст] / V.V. Galishnikova, P.Ja. Pahl // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. – Т. 14. – № 4. – P. 299-312.
14. Hanslo, P. Tangential differential calculus and the finite element modeling of a large deformation elastic membrane problem [Текст] / P. Hanslo, G. Larson Mats, F. Larson // Comput. Mech. – 2015. – Vol. 56. – № 1. – P. 87-95.
15. He, Xiaocong. Finite element analysis of torsional free vibration of adhesively bonded single-lap joints [Текст] / He, Xiaocong // Int. J. Adhes.and Adnes. – 2014. – № 48. – P. 59-66.
16. Levyakov, S.V. Application of triangular element invariants for geometrically nonlinear analysis of functionally graded shells [Текст] / S.V. Levyakov, V.V. Kuznetsov // Computational Mechanics. – 2011. – Vol. 48. – №. 4. – P. 499-513.
17. Nguyen, Nhung. Nonlinear, finite deformation, finite element analysise, ZAMP. [Текст] / Nhung Nguyen, Anthonym Waas // Z. Angew. math. and Phys. – 2016. – Vol. 67. – №. 9. – P. 35/1-35/24.
18. Sartorato, Murilo. A finite element formulation for smart piezollectric composite shells: Mathematical formulation, computational analysis and experimental evaluation [Текст] / Murilo Sartorato, Ricardo de Medeiros, Volnei Tita // Comros. Struct. – 2015. – №. 127. – P. 185-198.
19. Solodovnikov, A.S. Numerical study of strength properties for a composite material with short reinforcing fibers [Текст] / A.S. Solodovnikov, S.V.Sheshenin // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2017. – Т. 72. – № 4. – P. 94-100.
20. Storozhuk, E.A. Stress Distribution Near a Circular Hole in a Flexible Orthotropic Cylindrical Shell of Elliptical Cross-Section [Текст] / E.A. Storozhuk, S.M. Komarchuk // International Applied Mechanics. – 2018. – № 54(6). – P. 687-694.
21. Storozhuk, E.A. Stress-Strain State Near a Hole in a Shear-Compliant Composite Cylindrical Shell with Elliptical Cross-Section [Текст] / E.A. Storozhuk, I.S. Chernyshenko, A.V. Yatsura // International Applied Mechanics. – 2018. – № 54(5). – P. 559-567.
22. Zheleznov, L.P. Nonlinear deformation and stability of discretely reinforced elliptical cylindrical shells under transverse bending and internal pressure [Текст] / L.P. Zheleznov, V.V. Kabanov, D.V. Boiko // Russian Aeronautics. – 2014. – Т. 57. – № 2. – P. 118-126.

Информация об авторах

Клочков Юрий Васильевич, заведующий кафедры «Высшая математика», Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26), доктор технических наук, профессор.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1027-1811>. E-mail: klotchkov@bk.ru.

Николаев Анатолий Петрович, профессор кафедры «Прикладная геодезия, природообустройство и водопользование», Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26), доктор технических наук, профессор.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7098-5998>. E-mail: anpetr40@yandex.ru.

Фомин Сергей Денисович, доцент кафедры «Механика», заведующий Центром наукометрического анализа и международных систем индексирования Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26), доктор технических наук, доцент.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7910-9284>. E-mail: fsd_58@mail.ru.

Соболевская Татьяна Алексеевна, доцент кафедры «Высшая математика», Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26), кандидат технических наук.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9167-075X>. **E-mail:** moonway13@rambler.ru.

Андреев Александр Сергеевич, ассистент кафедры «Высшая математика», Волгоградского государственного аграрного университета (РФ, 400002, г. Волгоград, Университетский проспект, 26). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3763-0394>. **E-mail:** aandreev.07.1988@gmail.com

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 519.245.53.08

DOI: 10.32786/2071-9485-2019-02-35

СИЛОВЫЕ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ РУЛЕВОГО УСИЛИТЕЛЯ

POWER AND KINEMATIC DEPENDENCE OF THE STEERING AMPLIFIER

Г.Д. Кокорев, доктор технических наук, доцент

И.А. Успенский, доктор технических наук, профессор

И.А. Юхин, доктор технических наук, доцент

И.А. Афиногенов, аспирант

G.D. Kokorev, I.A. Uspensky, I.A. Yukhin, I.A. Afinogenov

*ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет
имени П.А. Костычева»*

*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
Ryazan State Agrarian University named after P.A. Kostycheva*

Дата поступления в редакцию 04.03.2019

Дата принятия к печати 12.05.2019

Received 00.00.2019

Submitted 12.05.2019

В статье рассматривается методика оценки силовых и кинематических зависимостей рулевого усилителя с помощью предложенных автором математических моделей на примере практического расчета гидравлического рулевого усилителя автомобиля Урал 4320. Определена актуальность исследования параметров и характеристик рулевого усилителя для выполнения предъявляемых к нему требований по кинематическому следящему действию (перемещению) и силовому следящему действию (по силе сопротивления повороту). Проведен теоретический и практический анализ предложенной методики и ее преимуществ перед другими. Рассмотрено математическое обоснование основных критериев и параметров гидравлического рулевого усилителя. Рассчитано усилие на штоке силового цилиндра от момента сопротивления повороту управляемых колес, давление рабочей жидкости в гидравлическом рулевом усилителе от скорости движения автомобиля на повороте, давление рабочей жидкости в силовом цилиндре в зависимости от дорожных условий. На основе проведенных расчетов определены числовые показатели исследуемых параметров и построены их графические зависимости. Сделан положительный вывод о целесообразности применения данной методики для оценки силовых и кинематических зависимостей рулевого усилителя. Предложенные математические модели расчета силовых и кинематических зависимостей могут быть применены для расчета характеристик и параметров других рулевых усилителей и повышения эффективности их работы.

The article discusses the method of assessing the power and kinematic dependencies of the steering amplifier using the mathematical models proposed by the author, using the example of practical calculation of the hydraulic steering amplifier of a Ural 4320 vehicle.) and force tracking action (by the force of resistance to rotation). A theoretical and practical analysis of the proposed method and