

А.Г. КОЛЕСНИКОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ ОПОРНЫХ СВЯЗЕЙ НА СНИЖЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ

Аннотация. Рассматриваются пологие оболочки на квадратном и прямоугольном плане. Исследуются пологие оболочки как постоянной, так и переменной вдоль образующей толщины с учетом геометрической нелинейности. Рассматривается потеря устойчивости конструкции в следствии уменьшения жесткости одной из опорных связей (переходе от жесткого защемления к шарнирному опиранию). Для решения дифференциальных уравнений пологих геометрически нелинейных оболочек применяется метод Бубнова-Галёркина. В качестве аппроксимирующих выбраны балочные функции В.З. Власова. Использование безразмерных величин позволяет повторить вычисления и получить аналогичные зависимости. Приводятся графики, позволяющие оценить снижение критической нагрузки в оболочке на каждом этапе уменьшения жесткости опоры и спрогнозировать дальнейшее поведение конструкции. Показываются закономерности изменения внутренних усилий для различных видов опирания конструкции. Делаются выводы о необходимых конструктивных решениях для предотвращения прогрессирующего разрушения оболочки в следствии уменьшения жесткости одной из опор.

Ключевые слова: пологая оболочка, устойчивость конструкций, жесткость связей, геометрическая нелинейность, прогрессирующее обрушение.

A.G. KOLESNIKOV¹

¹FSBEIHE «Southwest State University», Kursk, Russia

THE SUPPORT BONDS RIGIDITY INFLUENCES ON THE CARRYING CAPACITY REDUCTION OF THE SHALLOW SHELLS ON A RECTANGULAR PLAN

Abstract. Geometric nonlinearity shallow shells on a square and rectangular plan with constant and variable thickness are considered. Loss of stability of a structure due to a decrease in the rigidity of one of the support (transition from fixed support to hinged support) is considered. The Bubnov-Galerkin method is used to solve differential equations of shallow geometrically nonlinear shells. The Vlasov's beam functions are used for approximating. The use of dimensionless quantities makes it possible to repeat the calculations and obtain similar dependences. The graphs are given that make it possible to assess the reduction in the critical load in the shell at each stage of reducing the rigidity of the support and to predict the further behavior of the structure. Regularities of changes in internal forces for various types of structure support are shown. Conclusions are made about the necessary design solutions to prevent the progressive collapse of the shell due to a decrease in the rigidity of one of the supports.

Keywords: shallow shell, structural stability, bond stiffness, geometric nonlinearity, progressive collapse.

Введение.

В соответствии с СП [1] при реконструкции объектов повышенного и нормального уровня ответственности должна быть обеспечена их защита от прогрессирующего обрушения. Согласно п. 4.5.3 того же документа, для большепролетных конструкций следует рассматривать локальное разрушение одной из несущих конструкций - колонн, элементов ферм или стержневых структур, опорных и компрессионных колец, главных балок и опорных узлов.

Анализ научных публикаций, посвященных оценке сопротивляемости конструктивных систем зданий и сооружений прогрессирующему обрушению, а также существующих и разрабатываемых нормативных документов разных стран, показывает, что в качестве критериев такой оценки, как правило, выступают прочностные показатели [2-5].

Также значительная часть исследований в этой области направлена на изучение механизмов сопротивления прогрессирующему разрушению зданий с рамным или рамно-связевым железобетонным каркасом при аварийных воздействиях [6-8]. В качестве механизмов его сопротивления прогрессирующему сопротивлению в, как правило, выделяются следующие: арочный, вантовый, ферма Виренделя [9,10].

Встречаются анализы современных подходов к оценке конструктивной безопасности зданий и сооружений, которые в общем случае сводится к учету энергетических несовершенств силового сопротивления материалов теории накопления повреждений и выявлению ключевых элементов системы, ответственных за геометрическую неизменяемость, кинематическую устойчивость и живучесть [11,12]. Приводятся конкретные случаи оценки резерва конструктивной безопасности железобетонных конструкций [13,14].

Конструкции типа тонких пологих оболочек мало затрагиваются в подобных исследованиях ввиду сложности расчетов и ограниченной сферы применения. Тем не менее, поведение таких конструкций при запроектных воздействиях вызывает интерес. В работе предполагается, что частичное разрушение опоры пологой оболочки на прямоугольном плане, может привести к изменению типа опирания, что в свою очередь неизбежно отразится на внутренних усилиях общей устойчивости конструкции.

Исследование потери устойчивости пологой оболочки постоянной толщины.

Дифференциальные уравнения пологих геометрически нелинейных оболочек на прямоугольном плане могут быть записаны в виде [15, 16]:

$$\begin{cases} \frac{1}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \varphi + k_y \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + k_x \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2k_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 = 0, \\ D \nabla^2 \nabla^2 w - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \left(k_x + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \left(k_y + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \left(k_{xy} + \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) - Z = 0; \end{cases} \quad (1)$$

где φ – функция усилий, w – прогиб, $k_x \approx \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}$, $k_y \approx \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}$ – кривизны срединной поверхности оболочки, $k_{xy} \approx \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}$ – кручение срединной поверхности оболочки, $F = F(x, y)$ – уравнение срединной поверхности оболочки при начальном нагружении.

Значения величин верхних критических нагрузок для различных видов закрепления краев оболочек будем находить с помощью метода Бубнова – Галеркина, аппроксимируя функции напряжений и перемещений в виде

$$\varphi(x, y) = A \bar{w}(x, y), w(x, y) = B \bar{w}(x, y).$$

Выберем функцию $\bar{w}(x, y)$ таким образом, чтобы удовлетворялись условия для общего случая – упругая заделка по краям оболочки в отношении поворотов. Власовым В.З. было предложено использовать в качестве фундаментальных функций собственные функции, получающиеся из решения задачи изгиба балки, которые получили название «балочные функции» [17].

$$\bar{w}(x, y) = Z_x Z_y.$$

Чтобы определить балочные функции Z_x и Z_y для различных типов опирания оболочки и загрузки в виде равномерно распределенной интенсивности, рассмотрим простую балку, нагруженную опорными моментами и интенсивностью q (рисунок 1). Оси выберем в середине пролета балки. Тогда выражение для изгибающего момента в сечении x запишется как

$$M_x = -M_b + R_b(a - x) - q \frac{(a-x)^2}{2}.$$

Подставляем его в дифференциальное уравнение оси изогнутой балки:

$$EJz'' = -M_x,$$

и дважды интегрируем по x для граничных условий $x = \pm a, z = 0$. Получим выражения для балочных функций в безразмерном виде

$$Z_x = \frac{qa^4}{24EJ} \bar{Z}_x,$$

где

$$\bar{Z}_x = -\frac{m_a + m_b}{2} + 5 + \frac{m_a - m_b}{6} \frac{x}{a} + \left(\frac{m_a - m_b}{2} - 6 \right) \frac{x^2}{a^2} - \frac{m_a - m_b}{6} \frac{x^3}{a^3} + \frac{x^4}{a^4}; \quad (2)$$

а ширина поперечного сечения балки равна единице, то есть $J = \frac{h^3}{12}$.

Аналогично можно определить Z_y

$$Z_y = \frac{qb^4}{24EJ} \bar{Z}_y,$$

где $\bar{Z}_y$ – можно получить из (2) заменой (x/a) на (y/b) .

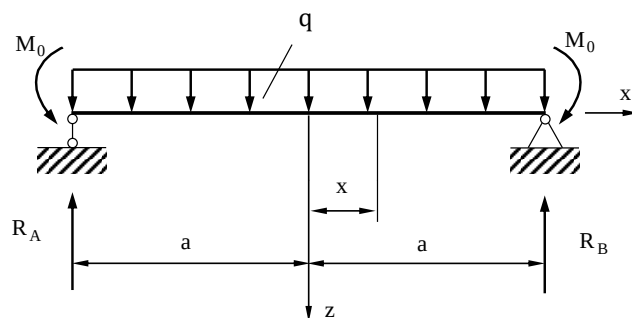


Рисунок 1 - Определение вида балочных функций при расположении осей в центре пролета

Величины m_a, m_b – постоянные коэффициенты, представляющие собой отношения опорных моментов шарнирно опертой балки, нагруженной интенсивностью q , к опорным моментам жестко защемленной с двух сторон балки такого же нагружения:

$$m_a = 12 \frac{M_a}{qa^2}; \quad m_b = 12 \frac{M_b}{qb^2}.$$

Их величины даны в таблице 1.

Таблица 1- Значение коэффициентов m_a и m_b для разных вариантов закрепления оболочки

Вид закрепления края оболочки	m_a	m_b
	0	0
	3/2	0
	1	1

Для решения системы (1) методом Бубнова – Галеркина умножим каждое уравнение на $\bar{w}$, и проинтегрируем дважды по всей площади оболочки [18].

$$\begin{cases} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left[\frac{A}{Eh} \nabla^2 \nabla^2 \bar{w} + Bk_y \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + Bk_x \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} - 2k_{xy} B \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} + \right. \\ \left. + B^2 \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} - B^2 \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \bar{w} dx dy = 0, \\ \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left[DB \nabla^2 \nabla^2 \bar{w} - A \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} k_x - AB \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} - Ak_y \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} - \right. \\ \left. - AB \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} + 2Ak_{xy} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} + 2AB \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} - Z \right] \bar{w} dx dy = 0. \end{cases}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} J_1 &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\nabla^2 \nabla^2 \bar{w}) \bar{w} dx dy, \\ J_2 &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x \partial y} \right) \bar{w} dx dy, \\ J_3 &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b (\Delta \bar{w}) \bar{w} dx dy, \\ J_4 &= \int_{-a}^a \int_{-b}^b Z \bar{w} dx dy. \end{aligned}$$

Функцию нагрузки Z представим в виде

$$Z = p_{cr} q(x, y),$$

где p_{cr} - коэффициент интенсивности критической нагрузки, $q(x, y)$ - функция очертания нагрузки.

Система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{A}{Eh} J_1 + B J_3 + B^2 J_3 = 0, \\ DB J_1 - A J_2 - AB J_3 - p_{cr} J_4 = 0. \end{cases}$$

Откуда

$$p_{cr} = C_1 B^3 + C_2 B^2 + C_3 B, \quad (3)$$

где

$$C_1 = 2Eh \frac{J_3^2}{J_1 J_4}, C_2 = 3E \frac{J_3 J_2}{J_1 J_4}, C_3 = D \frac{J_1^2}{J_1 J_4} + Eh \frac{J_2^2}{J_1 J_4}. \quad (4)$$

Потеря устойчивости 2-го рода выражается условием $\frac{dp_{cr}}{dw_0} = 0$, где w_0 - прогиб в центре оболочки.

Тогда можно записать, что $\frac{dp_{cr}}{dw_0} = \frac{dp_{cr} dB}{dB dw_0} = 0$, но $\frac{dB}{dw_0} \neq 0$, тогда $\frac{dp_{cr}}{dB} = 0$.

Находим экстремум

$$\begin{aligned} \frac{dp_{cr}}{dB} &= 3C_1 B^2 + 2C_2 B + C_3 = 0; \\ B &= \frac{-C_2 \pm (C_2^2 - 3C_1 C_3)^{1/2}}{3C_1}. \end{aligned}$$

Согласно (3), (4) коэффициент интенсивности верхней критической нагрузки может быть вычислен по формуле:

$$p_{cr}^{\max} = \frac{2}{27} \frac{1}{C_1^2} \left[(C_2^2 - 3C_1 C_3)^{3/2} + C_2 \left(C_2^2 - \frac{9}{2} C_1 C_3 \right) \right].$$

Введем безразмерные переменные и новые обозначения:

$$t^* = \frac{f_0}{h}, p = \frac{p_{cr} \cdot a^4}{E f_0^4},$$

$$\psi_1 = \frac{1}{54} \left(\frac{\bar{J}_1 \bar{J}_4}{\bar{J}_2^2} \right)^2, \psi_2 = \frac{3\bar{J}_3}{\bar{J}_1 \bar{J}_4}, \psi_3 = 2 \frac{\bar{J}_3^2}{\bar{J}_1 \bar{J}_4}, \psi_4 = \frac{1}{12(1-\nu^2)} \frac{\bar{J}_1}{\bar{J}_4}, \psi_5 = \frac{1}{\bar{J}_1 \bar{J}_4},$$

$$\bar{J}_1 = a^2 J_1, \bar{J}_2 = \frac{a^2}{f_0} J_2, \bar{J}_3 = a^2 J_3, \bar{J}_4 = \frac{1}{a^2} J_4.$$

Тогда выражение для безразмерного коэффициента интенсивности критической нагрузки будет иметь вид:

$$p = \psi_1 \frac{1}{(t^*)^4} \left\{ [(t^*)^2 \psi_2^2 \bar{J}_2^2 - 3\psi_2(\psi_4 + (t^*)^2 \psi_5 \bar{J}_2^2)]^{3/2} + \right.$$

$$\left. + t^* \psi_2 \bar{J}_2 \left[(t^*)^2 \psi_2^2 \bar{J}_2^2 - \frac{9}{2} \psi_3(\psi_4 + (t^*)^2 \psi_5 \bar{J}_2^2) \right] \right\}.$$

Изменяя значения коэффициентов m_a и m_b , представляющих собой отношения опорных моментов шарнирно опертой балки к опорным моментам жестко защемленной с двух сторон балки такого же нагружения, можно проанализировать снижение значения критической нагрузки полой оболочкой вследствие потери жесткости опор (рисунок 2).

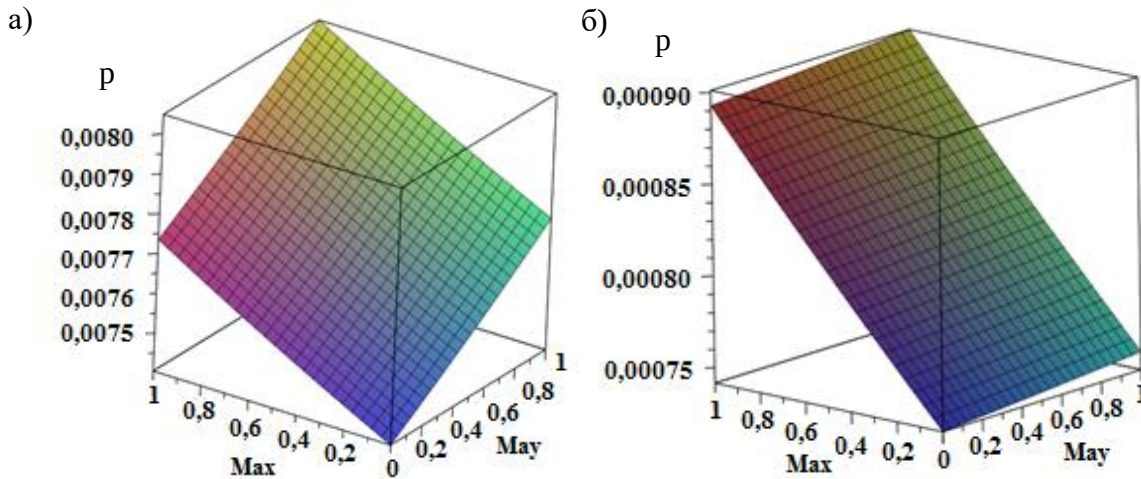


Рисунок 2 - Зависимость критической нагрузки оболочки постоянной толщины от жесткости опор:
а) для квадратной в плане оболочки, б) для прямоугольной в плане оболочки.

Графики показывают практически линейную зависимость снижения критической нагрузки от жесткости опор примерно на 10%. Для прямоугольной оболочки особенно важна жесткость опор, но направлению короткой стороны.

Аналогично можно проанализировать изменение критической нагрузки для оболочки переменной толщины [19, 20].

Система уравнений аналогична (1) с учетом того, что

$$h(x, y) = h_0 \left(1 + \kappa \left(\frac{x}{a} \right)^{2\eta} \right) \left(1 + \kappa \left(\frac{y}{b} \right)^{2\eta} \right). \quad (5)$$

где h_0 – толщина оболочки в центре, η - параметр формы изменения толщины оболочки; κ - параметр, отвечающий за соотношение толщины оболочки на краю и в центре: при $\kappa < 0$ оболочка имеет толщину в центре больше, чем на краю; при $\kappa > 0$ - имеет толщину в центре меньше, чем на краю; при $\kappa = 0$ - толщина оболочки постоянна вдоль образующей. Далее приняты пределы изменения $-0,4 \leq \kappa \leq 0,4$, как описывающие подавляющее большинство возможных форм толщин, которые могут встретиться в практических приложениях.

Целесообразнее рассматривать оболочки, толщина которых на краю больше, чем в центре с плавным изменением толщины, т.к. они нашли большее распространение в практике строительства (рисунок 3).

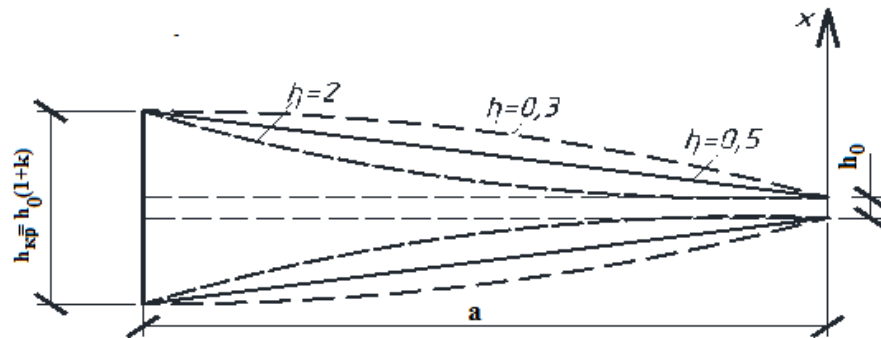


Рисунок 3 - Распределение толщин оболочки при $k < 0$

На рисунке 4 показано изменение критической нагрузки для пологой оболочки переменной толщины со значениями $k = 0,2$ и $\eta = 2$.

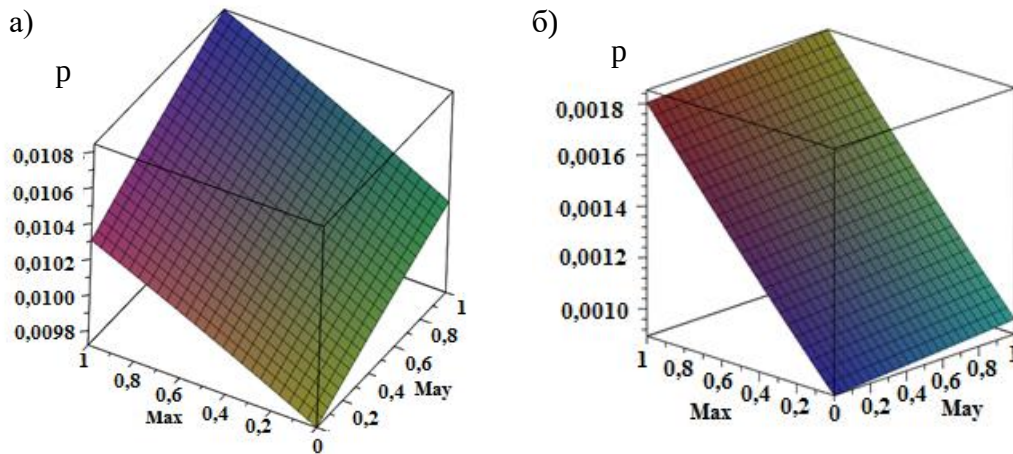


Рисунок 4 - Зависимость критической нагрузки оболочки переменной толщины от жесткости опор: а) для квадратной в плане оболочки, б) для прямоугольной в плане оболочки.

Как видно из рисунка, устойчивость конструкции заметно снижается при уменьшении жесткости одной из поддерживающих опор, особенно для оболочки с переменной вдоль образующей толщиной.

Исследование внутренних усилий в пологой оболочке при изменении жесткости опоры.

Эквивалентные напряжения, возникающие в оболочке, можно представить в безразмерном виде как [21]

$$\sigma = \frac{E f_0^4}{a^4} \bar{\sigma}.$$

где

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2)^2]},$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &= \left| \frac{6}{t^*} \bar{D} \bar{B} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \nu \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \right) \right| + \left| \bar{A} \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x t^* \right| + \left| \frac{g}{(t^*)^2} \bar{D} \bar{B} \left(\frac{\partial^3}{\partial x^3} Z_x Z_y + \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y \right) \right|, \\ \bar{\sigma}_2 &= \left| \frac{6}{t^*} \bar{D} \bar{B} \left(\nu \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \right) \right| + \left| \bar{A} \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y t^* \right| + \left| \frac{g}{t^{*2}} \bar{D} \bar{B} \left(\frac{\partial^3}{\partial y^3} Z_y Z_x + \frac{\partial}{\partial y} Z_y \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x \right) \right|, \end{aligned}$$

здесь

$$\bar{D} = \frac{D}{Eh^3}, \bar{A} = \frac{A \cdot a^2}{E f_0^5}, \bar{B} = \frac{B_1 \cdot a^2}{f_0^3}, g = \frac{f_0}{a}. \quad (6)$$

$$B_1 = \frac{1}{6C_1} (36C_3C_2C_1 + 108qC_1^2 - 8C_2^3 + 12\sqrt{3}(4C_3^3C_1 - C_3^2C_2^2 + 18C_3C_2C_1q + 27q^2C_1^2 - 4qC_2^3)^{1/2}C_1)^{1/3} - \frac{2}{3}(3C_3C_1 - C_2^2)/(C_1(36C_3C_2C_1 + 108qC_1^2 - 8C_2^3 + 12\sqrt{3}(4C_3^3C_1 - C_3^2C_2^2 + 18C_3C_2C_1q + 27q^2C_1^2 - 4qC_2^3)^{1/2}C_1)^{1/3} - \frac{1}{3}\frac{C_2}{C_3}).$$

$$A = -\frac{1}{J_1}(B_1J_2 + B_1^2J_3).$$

Внутренние усилия в оболочке имеют вид

$$N_x = A Z_x \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y, \quad (7)$$

$$N_y = A \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y,$$

$$S = -A \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y,$$

$$M_x = -DB_1 \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \nu \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \right],$$

$$M_y = -DB_1 \left[\nu \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x Z_y + \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y Z_x \right], \quad (8)$$

$$T = -DB_1 \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y,$$

$$Q_x = -DB_1 \left[\frac{\partial^3}{\partial x^3} Z_x Z_y + \frac{\partial}{\partial x} Z_x \frac{\partial^2}{\partial y^2} Z_y \right], \quad (9)$$

$$Q_y = -DB_1 \left[Z_x \frac{\partial^3}{\partial y^3} Z_y + \frac{\partial^2}{\partial x^2} Z_x \frac{\partial}{\partial y} Z_y \right].$$

Как видно, меняя значения коэффициентов m_a и m_b , входящие в балочные функции Z_x , Z_y , можно проанализировать изменения внутренних усилий в полой оболочке (рисунок 5-6).

Аналогично можно проанализировать изменение внутренних усилий для полой оболочки с переменной вдоль образующей толщиной, подставив выражение (5) в выражение (6).

Исследуем распределение значений изгибающих моментов (8) вдоль оси x (рисунок 5).

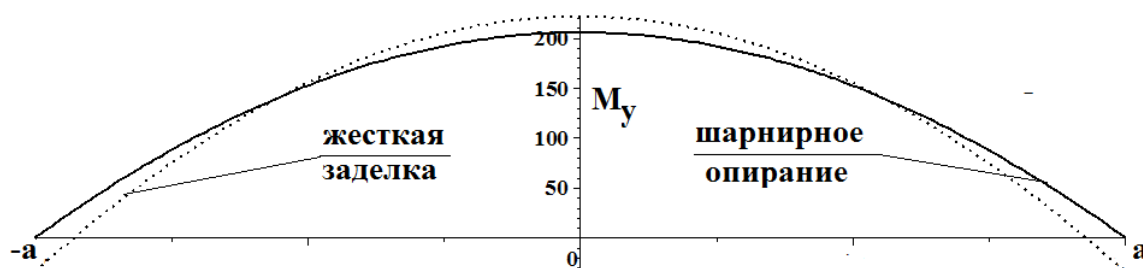


Рисунок 5 - Распределение значений изгибающих моментов вдоль оси x

График (рисунок 5) показывает, что с уменьшением жесткости опор, максимальное значение изгибающих моментов тоже уменьшается, однако, в приопорных зонах, их величины увеличиваются.

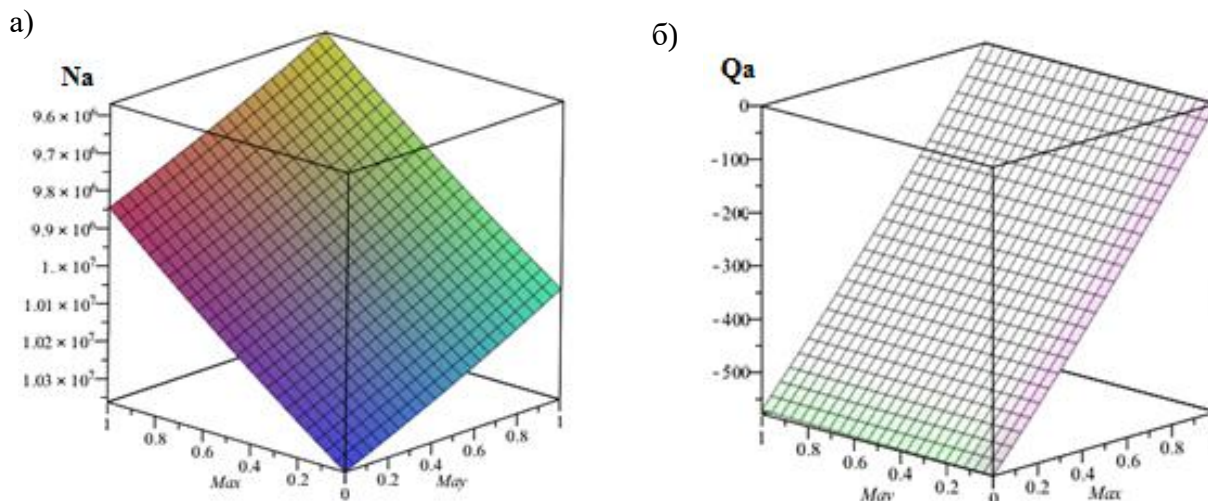


Рисунок 6 - Влияние жесткости опоры на внутренние усилия в оболочке:
а) на продольные усилия (7), б) на поперечные усилия (9).

Графики на рисунке 6 позволяют спрогнозировать увеличение продольных и поперечных усилий в центре оболочки при уменьшении способности воспринимать опорой изгибающий момент. Продольное усилие относительно оси «х» увеличивается пропорционально снижению жесткости как в направлении оси «х», так и оси «у». Поперечное усилие относительно оси «х» увеличивается пропорционально снижению жесткости как в направлении оси «х», жесткость опоры в направлении «у» практически не оказывает влияние на поперечное усилие относительно оси «х».

Выводы.

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы:

- уменьшение жесткости одной из опор (переход от жесткого защемления к шарнирному опиранию) оказывает значительное влияние как на величину критической нагрузки, так и на значение внутренних усилий в пологих оболочках;
- представленные зависимости справедливы как для оболочек постоянной толщины, так и для пологих оболочек с переменной вдоль образующей толщиной;
- наглядное снижение критической нагрузки показывает необходимость проектирования альтернативных путей передачи усилий при локальном разрушении одной из опор;
- необходимо предусматривать дополнительные конструктивные элементы, обеспечивающие возможность восприятия измененных усилий при локальном разрушении. Например, учесть дополнительное армирование в приопорной зоне, способное воспринимать усилия в сжатой зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения». М.: Минстрой России, 2019. 33 с.
2. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss // Int. J. Struct. Stab. Dyn. 2018. Vol. 18, № 03. P. 1850038
3. Wang Hao, Zhang Anqi, Li Yi, Yan Weiming. A Review on Progressive Collapse of Building Structures // The Open Civil Engineering Journal. 2014. 8(1). Pp. 183-192.
4. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Eng. Struct. Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122-149.
5. Al-Salloum Y.A., Abbas H., Almusallam T.H., Ngo T., Mendis P. Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower // Journal of King Saud University - Engineering Sciences. 2017. Vol. 29. Pp. 313-320. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.06.005

6. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability // *Mag. Civ. Eng.* 2018. Vol. 80. № 4. P. 73-80.
7. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Ковалев В.В. Критериальная оценка несущей способности сжато-изогнутых элементов реконструируемого железобетонного каркаса при аварийной расчетной ситуации // *Строительство и реконструкция*. 2020. 1 (87). С. 71-80.
8. Семенов А.А., Порываев И.А., Кузнецов Д.В., Нгуен Т.Х., Саитгалина А.С., Трегубова Е.С., Напряженно-деформированное состояние высотного здания при ветровом воздействии и прогрессирующем обрушении // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 8(59). С. 7-26. DOI: 10.18720/CUBS.59.1
9. Shan L. et al. Robustness of RC buildings to progressive collapse: Influence of building height // *Eng. Struct. Elsevier*. 2019. Vol. 183. № August 2018. P. 690-701.
10. Marjanishvili S., Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // *J. Perform. Constr. Facil.* 2006.
11. Шапиро Г.И., Обухова Л.В., Эйсман Ю.А., Сиротина Е.В. Защита от прогрессирующего обрушения жилых домов первого периода индустриального домостроения серий 1 510, 1-511, 1-515 // *Промышленное и гражданское строительство*. 2006. № 4. С. 32-35.
12. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Dynamic effects in a composite two-component rods which appear when local fracture of the matrix is occurred // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. № 3. Pp: 325-331. DOI: 10.5937/jaes15-14602
13. Бондаренко В.М., Ключева Н.В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионного повреждения // *Известия вузов. Строительство*. 2008. № 1. С. 4-12.
14. Андросова Н.Б., Ветрова О.А. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно- нормативных документах России и странах Евросоюза // *Строительство и реконструкция*. 2019. №1 (81). С. 85-96
15. Ступишин Л.Ю., Колесников А.Г. Восстановление несущей способности и эксплуатационных характеристик геометрически нелинейных пологих оболочек на прямоугольном плане // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 2. С. 51-53.
16. Андреев В. И., Полякова Л. С. Аналитическое решение физически нелинейной задачи для неоднородной толстостенной цилиндрической оболочки // *Вестник МГСУ*. 2015. № 11. С. 38-45.
17. Власов В.В. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.: Гостехиздат, 1949. 812с.
18. Ступишин Л.Ю., Колесников А.Г., Озерова Т.А. Исследование напряженно-деформированного состояния пологих геометрически нелинейных оболочек вращения // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*. 2012. № 2-3. С. 232-235.
19. Stupishin L., Kolesnikov A., Nikitin K. Variable form forming investigation for flexible shallow shells on circular base // *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017. T. 18. № 2. С. 163-171.
20. Stupishin L.Y., Kolesnikov A.G., Nikitin K.E. Optimal design of flexible shallow shells on elastic foundation // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. T. 15. № 3. С. 349-353.
21. Трушин С.И., Мокин Н.А. Численно-аналитическое решение задачи термоупругости цилиндрической оболочки // *Научное обозрение*. 2015. № 19. С. 151-155.

REFERENCES

1. SP 385.1325800.2018 «Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya» [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Basic provisions]. М.: Minstroy Rossii, 2019. 33 p (rus)
2. Tsai M.H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.* 2018. Vol. 18. No. 03. P. 1850038
3. Wang Hao, Zhang, Anqi, Li Yi, Yan Weiming. A Review on Progressive Collapse of Building Structures. *The Open Civil Engineering Journal*. 2014. 8(1). Pp. 183-192.
4. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng. Struct. Elsevier*. 2018. Vol. 173, No. March. P. 122-149.
5. Al-Salloum Y.A., Abbas H., Almusallam T.H., Ngo T., Mendis P. Progressive collapse analysis of a typical RC high-rise tower. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2017. Vol. 29. Pp. 313-320. DOI: 10.1016/j.jksues.2017.06.005
6. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Survivability criteria for reinforced concrete frame at loss of stability. *Mag. Civ. Eng.* 2018. Vol. 80, No. 4. P. 73-80.
7. Savin S.YU., Kolchunov V.I., Kovalev V.V. Kriterial'naya ocenka nesushchej sposobnosti szhatykh izognutykh elementov rekonstruirovannogo zhelezobetonnogo karkasa pri avarijnoj raschetnoj situacii [Criteria assessment of the bearing capacity of compressed-bent elements of the reconstructed reinforced concrete frame in an emergency design situation]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2020. 1 (87). P. 71-80. (rus)

8. Semenov A.A., Poryvaev I.A., Kuznecov D.V., Nguen T.H., Saitgalina A.S., Tregubova E.S., Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vysotnogo zdaniya pri vetrovom vozdeystvii i progressiruyushchem obrushenii [The stress-strain state of a high-rise building under wind action and progressive collapse]. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2017. No. 8(59). Pp. 7-26. DOI: 10.18720/CUBS.59.1 (rus)
9. Shan L. et al. Robustness of RC buildings to progressive collapse: Influence of building height. *Eng. Struct. Elsevier*. 2019. Vol. 183, No. August 2018. P. 690-701.
10. Marjanishvili S., Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // J. Perform. Constr. Facil. 2006.
11. Shapiro G.I., Obuhova L.V., Ejsman Yu.A., Sirotina E.V. Zashchita ot progressiruyushchego obrusheniya zhilyh domov pervogo perioda industrial'nogo domostroeniya serij 1 510, 1-511, 1-515 [Protection against the progressive collapse of residential buildings of the first period of industrial housing construction series 1 510, 1-511, 1-515]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2006. No. 4. Pp. 32-35. (rus)
12. Kolchunov V.I., Savin S.Y. Dynamic effects in a composite two-component rods which appear when local fracture of the matrix is occurred. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. No. 3. Pp: 325-331. DOI: 10.5937/jaes15-14602
13. Bondarenko V.M., Klyueva N.V. K raschetu sooruzhenij, menyayushchih raschetnyu skhemu vsledstvie korrozionnogo povrezhdeniya [To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2008. No. 1. Pp. 4-12. (rus)
14. Androsova N.B., Vetrova O.A. Analiz issledovaniy i trebovaniy po zashchite zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya v zakonadatel'no-normativnyh dokumentah rossii i stranah Evrosoyuza [Analysis of studies and requirements for the protection of buildings and structures from progressive collapse in the legislative and regulatory documents of russia and the countries of the European Union]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2019. №1 (81). Pp. 85-96 (rus)
15. Stupishin L.Yu., Kolesnikov A.G. Vosstanovlenie nesushchej sposobnosti i ekspluatatsionnyh harakteristik geometricheski nelinejnyh pologih obolochek na pryamougol'nom plane [Restoring the bearing capacity and performance of geometrically nonlinear shallow shells on a rectangular plan]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2014. No. 2. Pp. 51-53. (rus)
16. Andreev V.I., Polyakova L.S. Analiticheskoe reshenie fizicheski nelinejnoj zadachi dlya neodnorodnoj tolstostennoj cilindricheskoj obolochki [Analytical solution of a physically nonlinear problem for an inhomogeneous thick-walled cylindrical shell]. *Vestnik MGSU*. 2015. No. 11. Pp. 38-45.
17. Vlasov V.V. Obshchaya teoriya obolochek i ee prilozheniya v tekhnike [General theory of shells and its applications in technology]. Moscow, Gostekhizdat publ., 1949. 812 p. (rus)
18. Stupishin L.Yu., Kolesnikov A.G., Ozerova T.A. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pologih geometricheski nelinejnyh obolochek vrashcheniya [Study of the stress-strain state of shallow geometrically nonlinear shells of revolution]. *Izvestiya YUGO-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*. 2012. No. 2-3. Pp. 232-235.
19. Stupishin L., Kolesnikov A., Nikitin K. Variable form forming investigation for flexible shallow shells on circular base. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 18. No. 2. Pp. 163-171.
20. Stupishin L.Y., Kolesnikov A.G., Nikitin K.E. Optimal design of flexible shallow shells on elastic foundation. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. No. 3. Pp. 349-353.
21. Trushin S. I., Mokin N. A. CHislenno-analiticheskoe reshenie zadachi termouprugosti cilindricheskoj obolochki [Numerical-analytical solution of the problem of thermoelasticity of a cylindrical shell]. *Nauchnoe obozrenie*. 2015. No. 19. Pp. 151-155 (rus)

Информация об авторе:

Колесников Александр Георгиевич

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры УЗС.
E-mail: ag-kolesnikov@mail.ru

Information about author:

Kolesnikov Alexander G.

FSBEI HE " Southwest State University ", Kursk, Russia,
candidate of technical sciences, docent of the department of UBS.
E-mail: ag-kolesnikov@mail.ru