

которые приведены выше, получены вертикальные перемещения узлов, и углы поворота соответственно:

$$Z_1 = -0.0117 м; \quad Z_2 = Z_3 = 0.00692 рад; \quad Z_4 = Z_5 = 0.0005 м;$$

$$Z_6 = 0.08224 м$$

**Выводы.** В рассматриваемой работе предложен новый нетрадиционный математически несложный подход и приведена методика для расчета системы перекрестных балок на упругом основании Винклера на вертикальную нагрузку. Этот подход и методика основаны на классическом методе перемещений для расчета плоских рам на пространственную нагрузку, только в однопролетных балках при определении реакций от внешней нагрузки и единичных смещений учитываются реактивные давления, возникающие на контакте подошвы балки с основанием Винклера.

Численная реализация предлагаемой выше методики осуществлена через компьютерное моделирование системы перекрестных балок на упругом основании Винклера при ее расчете на вертикальную нагрузку с использованием прикладного пакета «МАТНЕМАТИСА».

#### Список цитированных источников

1. Горбунов-Посадов, М.И. Расчет конструкций на упругом основании / М.И. Горбунов-Посадов, Т.А. Маликова, В.И. Соломин. – М.: Стройиздат, 1984. – 631 с.
2. Симвулиди, И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании. – М.: Высшая школа, 1987. – 576 с.
3. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно-деформируемом основании. – Могилев: БРУ, 2003. – 269 с.
4. Александров, А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М.: Высшая школа, 1990. – 400 с.
5. Жемочкин, Б.Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом / Б.Н. Жемочкин, А.П. Сеницын. – М.: Стройиздат, 1962. – 262 с.
6. Пащевский, Д.П. Применение метода деформаций к расчету балки на упругом основании // Исследования по теории сооружений. – VI. – 1954. – С.249-256.
7. Ржаницын, Р.А. Строительная механика. – М.: Высшая школа, 1991. – 439с.
8. Александров, А.В. Соппротивление материалов / А.В. Александров, В.Д. Потапов, Б.П. Державин. – М.: Высшая школа, 2000. – 560 с.
9. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: ФМ, Наука, 1975. – 576 с.

УДК 624.014

## УСТОЙЧИВОСТЬ ФОРМЫ СЕТЧАТЫХ КУПОЛОВ С ЖЁСТКИМИ УЗЛАМИ ПРИ ДЕЙСТВИИ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ВНЕШНЕЙ НАГРУЗКИ

Глушко К. К., Драган А. В.

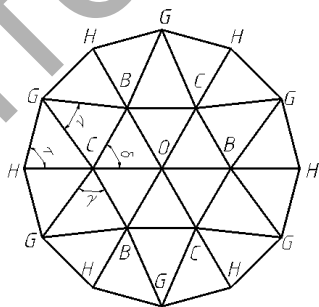
**Введение.** Сетчатые купола часто применяются при необходимости перекрытия больших пролётов. Основные преимущества таких конструкций – низкая материалоемкость, архитектурная выразительность и высокая жёсткость. В то же время особенностью статической работы под нагрузкой таких конст-

рукций является геометрически нелинейный процесс деформирования, что вызывает сложность расчёта таких конструкций и проверки отдельных видов их устойчивости. Один из видов потери устойчивости формы однослойных сетчатых куполов проявляется в виде продавливания к центру кривизны описанной сферы их узлов. Решение задачи потери устойчивости формы этих конструкций покрытий, проявляющейся в «прощёлкивании» их узлов при действии сосредоточенной узловой нагрузки, приведено в работах [1, 2, 5].

При проектировании светопрозрачных покрытий в виде однослойных сетчатых куполов устройство кровли часто принимается беспрогонным. Существует довольно немногочисленное количество работ, посвящённых потере устойчивости сетчатых куполов с жёсткими узлами, нагрузка на стержни которых принята распределённой.

**Основная часть.** Нагрузка однослойного сетчатого купола с треугольной стержневой сетью может быть представлена распределённой по треугольному закону с максимальным значением в середине стержня. Максимальное значение распределённой нагрузки находится на середине стержня. На рисунке 1 представлен план однослойного сетчатого купола.

Изменение внутренних усилий в стержнях описывается при помощи аналитических зависимостей от перемещений узлов однослойных сетчатых куполов, величины которых полагаются переменными. Для определения необходимого и достаточного для точного решения рассматриваемой задачи количества переменных величин перемещений узлов ярусов произведено сравнение процессов деформирования верхних стержневых многогранников в составе трёхъярусного и двухъярусного однослойных сетчатых куполов с целью сопоставления величины внешней нагрузки, определённой в виде суммы вертикальных проекций внутренних сил в стержнях.



*Рисунок 1 – План двухъярусного однослойного сетчатого купола*

На этом этапе наличие начальных геометрических несовершенств формы и влияние продольно-поперечного изгиба в стержнях не учитывалось. Опорный контур трёхъярусного однослойного сетчатого купола закреплён шарнирно-подвижно. В пределах рассмотренных сетчатых куполов величина внешней распределённой по площади нагрузки полагалась постоянной. Величина равнодействующей внешней нагрузки при этом принимается равной вертикальным проекциям внутренних усилий в стержнях.

При определении внутренних усилий в стержнях в радиальных плоскостях от перемещений узлов рассматриваемых однослойных сетчатых куполов использованы следующие допущения:

1) внешняя распределённая нагрузка действует вертикально;  
 2) стержни кольцевых направлений расположены горизонтально, длины стержней могут быть приняты одинаковыми, изгибные жёсткости стержней одинаковы;

3) рассматривается линейно-упругое деформирование стержней;

4) рассматривается плоская форма изгиба стержня в силу симметрии задачи;

5) влиянием податливостей и размерами узловых элементов можно пренебречь.

Необходимо рассмотреть фрагмент однослойного сетчатого купола, находящийся в секторе симметрии. На рисунке 2 показан рассматриваемый фрагмент и верхний стержневой многогранник с обозначением грузовых площадей на стержни.

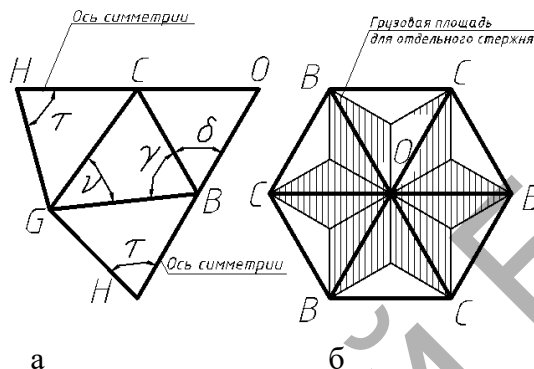


Рисунок 2 – Фрагмент однослойного сетчатого купола (а) и определение грузовых площадей (б)

Принимая малость углов наклона стержней радиальных направлений к горизонтальной плоскости, можно принять в свою очередь, что угол отклонения радиус-вектора, проведённого из центра описанной вокруг сетчатого купола сферы, будет также мал. Таким образом величины внутренних усилий можно проецировать на горизонтальные и вертикальные оси. Вертикальная ось в этом случае будет совпадать с направлением радиус-вектора, проведённого из центра описанной сферы к верхнему узлу сетчатого купола.

С учётом знаков уравнения равновесия типа  $O$  и  $C(B)$  может быть записано в следующем виде:

$$6(N_{OC}\beta \cdot (1 - \chi) - V_{OC}) = 0; \quad (1)$$

$$(N_{CH} + 2N_{CG}) \cdot 3\beta m \cdot (1 - \eta) - N_{OC}\beta(1 - \chi) + V_{OC} - V_{CH} - 2V_{CG} = 0, \quad (2)$$

где  $N$  – величина осевой силы,  $V$  – величина поперечной силы в рассматриваемом стержне,  $\beta$  – угол наклона стержней верхнего стержневого многогранника к горизонтальной плоскости,  $\chi$ ,  $\eta$  – параметры перемещений узлов, численно равные отношению перемещения верхнего конца стержня относительно нижнего к полной высоте яруса,  $m$  – коэффициент, позволяющий учитывать несовершенство формы осесимметричного характера однослойного сетчатого купола.

Для составления уравнений равновесия (1) и (2) необходимо определить зависимости, по которым изменяются внутренние усилия в стержнях. Для определения величин поперечных сил в стержнях необходимо рассмотреть изменение изгибающих моментов от перемещений узлов. На рисунке 3 показаны эпюры изгибающих моментов в характерных стержнях  $OC$ ,  $CB$ ,  $CH$ ,  $GH$ .

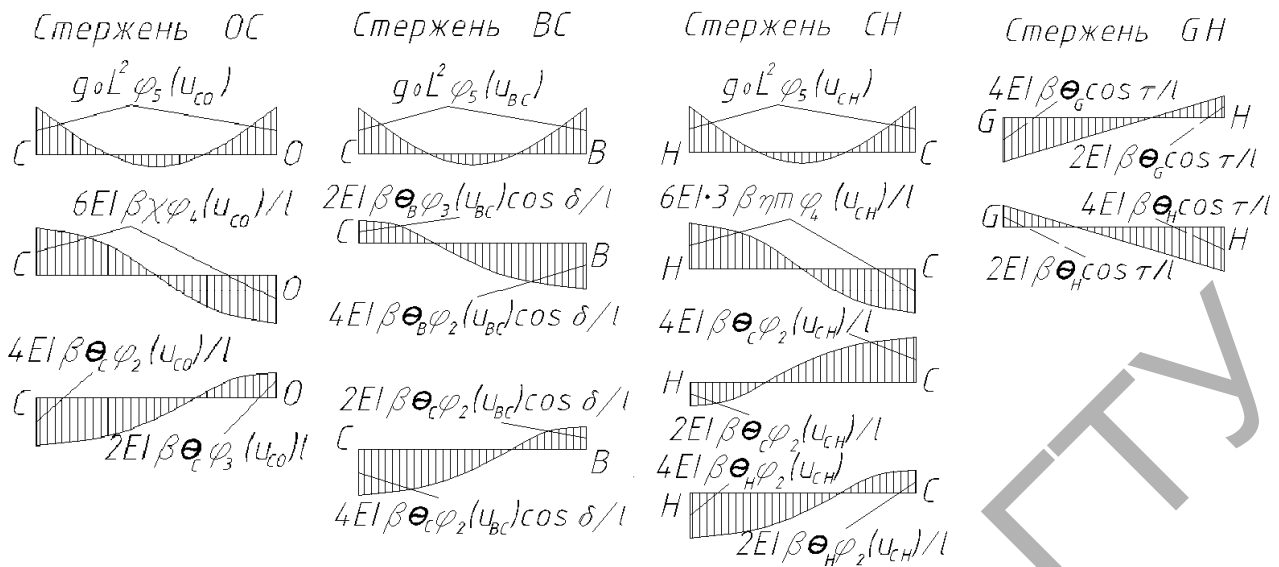


Рисунок 3 – Эпюры изгибающих моментов в стержнях двухъярусного сетчатого купола

Для определения величин изгибающих моментов на концах рассматриваемых стержней следует составить сумму моментов от отдельных видов деформаций:

$$\Sigma M_O^{OC} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{OC}) + 6 \frac{EI}{l} \varphi_4(u_{OC}) \beta \chi - 2 \frac{EI}{l} \varphi_3(u_{OC}) \beta \cdot \Theta_C; \quad (3)$$

$$\Sigma M_C^{OC} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{OC}) - 6 \frac{EI}{l} \varphi_4(u_{OC}) \beta \chi + 4 \frac{EI}{l} \varphi_2(u_{OC}) \beta \cdot \Theta_C; \quad (4)$$

$$\Sigma M_C^{BC} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{BC}) + 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_C \cos \delta \cdot (2\varphi_2(u_{BC}) - \varphi_3(u_{BC})); \quad (5)$$

$$\Sigma M_C^{CH} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{CH}) + 18 \frac{EI}{l} \beta \eta \eta \varphi_4(u_{CH}) - 4 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_C \varphi_2(u_{CH}) - 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_H \varphi_3(u_{CH}); \quad (6)$$

$$\Sigma M_H^{CH} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{CH}) - 18 \frac{EI}{l} \beta \eta \eta \varphi_4(u_{CH}) + 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_C \varphi_3(u_{CH}) + 4 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_H \varphi_2(u_{CH}); \quad (7)$$

$$\Sigma M_C^{CG} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{CG}) + 18 \frac{EI}{l} \beta \eta \eta \varphi_4(u_{CG}) - 4 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_C \cos \gamma \varphi_2(u_{CG}) - 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_G \cos 0.5 \nu \varphi_3(u_{CG}); \quad (8)$$

$$\Sigma M_G^{CG} = -g_0 l^2 \varphi_5(u_{CG}) - 18 \frac{EI}{l} \beta \eta \eta \varphi_4(u_{CG}) + 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_C \cos \gamma \varphi_3(u_{CG}) + 4 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_G \cos 0.5 \nu \varphi_2(u_{CG}); \quad (9)$$

$$\Sigma M_H^{GH} = -\frac{g_0 l^2}{20} + 4 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_H \cos \tau - 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_G \cos \tau; \quad (10)$$

$$\Sigma M_G^{GH} = -\frac{g_0 l^2}{20} - 2 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_H \cos \tau + 4 \frac{EI}{l} \beta \cdot \Theta_G \cos \tau, \quad (11)$$

где  $\varphi_2(u)$ ,  $\varphi_3(u)$ ,  $\varphi_4(u)$ ,  $\varphi_5(u)$ ,  $\eta_2(u)$  – функции параметра осевой силы, учитывающие её влияние на величины изгибных деформаций стержней, поскольку эпюры изгибающих моментов и поперечных сил в стержнях имеют криволинейное очертание [3, 4];  $\Theta$  – параметр угла поворота узла, численно равный отношению абсолютной величины угла поворота к углу  $\beta$ .

Функция параметра осевой силы  $\varphi_5(u)$  получена для действия нагрузки на стержень, распределённой по длине по закону параболы, площадь которой равна площади нагрузки, распределённой по треугольному закону. Такое представление является несколько приближённым, но погрешность такой записи при вычислении внутренних усилий не выходит за пределы вычислительной погрешности. Функция  $\varphi_5(u)$  может быть представлена в виде следующего выражения:

$$\varphi_5 = \frac{1}{u^3} \left( \frac{6}{u} - \frac{u^2 + 12}{4tg0,5u} \right). \quad (12)$$

С учётом принятого правила знаков для определения изгибающих моментов в стержнях можно составить уравнения равновесия узлов  $H$  и  $G$ .

$$\Sigma M_H^{CH} + 2 \cos \tau \cdot \Sigma M_H^{GH} = 0; \quad (13)$$

$$2 \cos 0,5\nu \cdot \Sigma M_G^{CG} + 2 \cos \tau \cdot \Sigma M_G^{GH} = 0. \quad (14)$$

Из выражений (13) и (14) можно составить систему линейных алгебраических уравнений относительно параметров углов поворота узлов  $\Theta_H$  и  $\Theta_G$ , которые можно представить в виде следующих выражений:

$$\Theta_H = A_H \Theta_C + m\eta \cdot B_H + \frac{g_0 l^3}{\beta \cdot EI} G_H; \quad (15)$$

$$\Theta_G = A_G \Theta_C + m\eta \cdot B_G + \frac{g_0 l^3}{\beta \cdot EI} G_G, \quad (16)$$

где  $A_H, A_G, B_H, B_G, G_H, G_G$  являются функциями параметра осевой силы:

$$A_H = - \frac{\cos^2 \tau (\varphi_3(u_{CG}) \cos(\gamma) \cos(0,5\nu) + \varphi_3(u_{CH})) + \varphi_2(u_{CG}) \varphi_3(u_{CH}) \cos^2(0,5\nu)}{Z_H}; \quad (17)$$

$$B_H = 9 \frac{\cos^2 \tau (\varphi_4(u_{CG}) \cos 0,5\nu + \varphi_4(u_{CH})) + \varphi_2(u_{CG}) \varphi_4(u_{CH}) \cos^2 0,5\nu}{Z_H}; \quad (18)$$

$$A_G = - \frac{\cos^2 \tau (4\varphi_3(u_{CG}) \cos \gamma \cdot \cos 0,5\nu + \varphi_3(u_{CH})) - 2\varphi_2(u_{CH}) \varphi_3(u_{CG}) \cos 0,5\nu \cdot \cos \gamma}{Z_G}; \quad (19)$$

$$B_G = 9 \frac{\cos^2 \tau (4\varphi_4(u_{CG}) \cos 0,5\nu + \varphi_4(u_{CH})) + 2\varphi_2(u_{CH}) \varphi_4(u_{CG}) \cos 0,5\nu}{Z_G}; \quad (20)$$

$$G_H = \frac{1}{40} \frac{\cos^2 \tau (3 \cos \tau + 20(\varphi_5(u_{CG}) \cos(0,5\nu) + \varphi_5(u_{CH}))) + 2\varphi_2(u_{CG}) \cos^2(0,5\nu) (\cos(\tau) + 10\varphi_3(u_{CH}))}{Z_H}; \quad (21)$$

$$G_G = \frac{1}{40} \frac{\cos \tau (\cos \tau (3 \cos \tau + 10\varphi_5(u_{CH})) + \varphi_2(u_{CH})) + 20 \cos(0,5\nu) \varphi_5(u_{CG}) (\varphi_2(u_{CH}) + 2 \cos^2 \tau)}{Z_H}, \quad (22)$$

где знаменатели  $Z_H$  и  $Z_G$  являются следующими выражениями:

$$Z_H = \cos^2 \tau (4\varphi_2(u_{CG})\cos^2(0,5\nu) + 2\varphi_2(u_{CH}) + 3\cos^2(\tau)) + 2\varphi_2(u_{CG})\varphi_2(u_{CH})\cos^2(0,5\nu); \quad (23)$$

$$Z_G = 2Z_H. \quad (24)$$

Из условия равновесия изгибающих моментов в узлах типа  $C(B)$  можно определить параметр их углов поворота:

$$\Theta_C = \Phi_\chi \cdot \chi + \Phi_\eta \cdot m\eta + \frac{g_0 l^3}{\beta EI} \Phi_g, \quad (25)$$

где

$$\Phi_\chi = \frac{3\varphi_4(u_{OC})}{Z_\Phi}; \quad (26)$$

$$\Phi_\eta = \frac{9(\varphi_4(u_{CH}) + 2\varphi_4(u_{CG})\cos\gamma) - B_H\varphi_3(u_{CH}) - 2B_G\varphi_3(u_{CG})\cos 0,5\nu \cos\gamma}{Z_\Phi}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \Phi_g = & \frac{\varphi_5(u_{CH}) - \varphi_5(u_{OC}) + 2\varphi_5(u_{CG})\cos\gamma}{2Z_\Phi} + \\ & + \frac{2G_H\varphi_3(u_{CH}) - 2\varphi_5(u_{BC})\cos\delta + 4G_g\varphi_3(u_{CG})\cos 0,5\nu \cos\lambda}{2Z_\Phi}; \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} Z_\Phi = & 2(\varphi_2(u_{CH}) + \varphi_2(u_{OC}) + 2\varphi_2(u_{BC})\cos^2\delta - \varphi_3(u_{BC})\cos^2\delta + 2\varphi_2(u_{CG})) + \\ & + 2A_G\varphi_3(u_{CG})\cos 0,5\nu \cdot \cos\gamma + A_H\varphi_3(u_{CH}). \end{aligned} \quad (29)$$

Зависимости для определения поперечных сил в стержнях можно записать в следующем виде:

$$\bar{V}_C^{OC} = \frac{V_C^{OC}}{\beta^3 EA} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CO})\chi + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CO})\Theta_C - \frac{q_0 l}{4\beta^3 EA}; \quad (30)$$

$$\bar{V}_B^{BC} = \frac{V_C^{BC}}{\beta^3 EA} = -\frac{q_0 l}{4\beta^3 EA}; \quad (31)$$

$$\bar{V}_C^{CH} = \frac{V_C^{CH}}{\beta^3 EA} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CH}) \cdot 3m\eta + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CH})(\Theta_C + \Theta_H) - \frac{q_0 l}{4\beta^3 EA}; \quad (32)$$

$$\bar{V}_C^{CG} = \frac{V_C^{CG}}{\beta^3 EA} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CG}) \cdot 3m\eta + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CG})(\Theta_C \cos\gamma + \Theta_H \cos 0,5\nu) - \frac{q_0 l}{4\beta^3 EA}, \quad (33)$$

где  $\bar{V}$  – безразмерный параметр поперечной силы в рассматриваемом стержне;  $V$  – поперечная сила в стержне;  $EA$  – жёсткость стержня на растяжение и сжатие.

Параметр  $n$  связывает геометрические характеристики подобранного сечения и геометрические характеристики стержневой системы, определённый как эквивалентная гибкость сетчатого купола, вычисляемая по формуле:

$$n = \sqrt{\frac{l^2 \beta^2 EA}{EI}} = \frac{\beta \cdot l}{i} = \frac{\Delta_1}{i}, \quad (34)$$

где  $\Delta_1$  – стрела подъёма стержневого многогранника;  $EI$  и  $i$  – изгибная жёсткость стержня и радиус инерции поперечного сечения стержней купола в радиальной плоскости соответственно.

Величины безразмерных параметров осевых сил можно определить из уравнений равновесия узлов в горизонтальном направлении, рассматривая их перемещение в горизонтальной плоскости. При этом принимается, что горизонтальные проекции поперечных сил малы по сравнению с горизонтальными проекциями осевых сил.

$$\bar{\varepsilon}_{OC} = \frac{N_{OC}}{\beta^2 EA} = \chi(1 - 0,5\chi) + 0,5 \cdot \bar{\varepsilon}_{BC} \sec \delta; \quad (35)$$

$$\bar{\varepsilon}_{CH} = \frac{N_{CH}}{\beta^2 EA} = \frac{4 \cos^2 \tau}{1 + 4 \cos^2 \tau} (9\eta m^2 (1 - 0,5\eta) - 0,5 \bar{\varepsilon}_{BC} \sec \delta); \quad (36)$$

$$\bar{\varepsilon}_{CG} = \frac{N_{CG}}{\beta^2 EA} = 0,5 \cdot \bar{\varepsilon}_{CH} \sec 0,5\nu; \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_{BC} = \frac{N_{BC}}{\beta^2 EA} = & 2 \cos \delta \frac{36m^2 \eta (1 - 0,5\eta) \cos^2 \tau (1 + \cos \gamma \cdot \sec 0,5\nu)}{(1 + 4 \cos^2 \tau)(1 + 4 \cos^2 \delta) + 4 \cos^2 \tau (1 + \cos \gamma \cdot \sec 0,5\nu)} - \\ & - 2 \cos \delta \frac{\chi(1 - 0,5\chi)(1 + 4 \cos^2 \tau)}{(1 + 4 \cos^2 \tau)(1 + 4 \cos^2 \delta) + 4 \cos^2 \tau (1 + \cos \gamma \cdot \sec 0,5\nu)}. \end{aligned} \quad (38)$$

Параметр  $u$  здесь для каждого из стержней может быть записан в виде следующего равенства:

$$u = l \sqrt{\frac{N}{EI}} = \sqrt{\frac{\varepsilon \beta^2 l^2 EA}{EI}} = n \sqrt{\varepsilon}. \quad (39)$$

Разделив уравнения равновесия узлов на вертикальную ось (1) и (2) на  $\beta^3 EA$ , составив вертикальные проекции осевых сил на вертикальную ось, можно получить следующие выражения:

$$6(\bar{\varepsilon}_{OC}(1 - \chi) - \bar{V}_{OC}) = 0; \quad (40)$$

$$3m \cdot (\bar{\varepsilon}_{CH} + 2\bar{\varepsilon}_{CG})(1 - \eta) - \bar{\varepsilon}_{OC}(1 - \chi) + \bar{V}_{OC} - \bar{V}_{CH} - 2\bar{V}_{CG} = 0. \quad (41)$$

Выражения (39) и (40) содержат величину распределённой нагрузки, входящую в состав выражений параметров поперечных сил и параметров углов поворота узлов. Соотнося величины распределённых нагрузок на стержни, выраженные из уравнений (40) и (41) и стоящих по одну сторону знака равенства, можно соотнести и другие части этих уравнений, стоящих по другую сторону знака равенства:

$$\frac{3m(\bar{\varepsilon}_{CH} + 2\bar{\varepsilon}_{CG})(1 - \eta) - \bar{\varepsilon}_{OC}(1 - \chi) + \bar{Q}_{OC} - \bar{Q}_{CH} - 2\bar{Q}_{CG} - \Omega}{6(\bar{\varepsilon}_{OC}(1 - \chi) - \bar{Q}_{OC})} = 0, \quad (42)$$

где

$$\Omega = \frac{1 + 4\Phi_g (2 \cos \gamma + 2 \cos 0,5\nu \cdot A_G + A_H) - G_G (G_H - 8 \cos 0,5\nu)}{1 - 24\Phi_g}; \quad (43)$$

$$\bar{Q}_C^{OC} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CO}) \chi + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CO}) \Psi_C; \quad (44)$$

$$\bar{Q}_C^{CH} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CH}) \cdot 3m\eta + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CH}) (\Psi_C + \Psi_H); \quad (45)$$

$$\bar{Q}_C^{CG} = -\frac{12}{n^2} \cdot \eta_2(u_{CG}) \cdot 3m\eta + \frac{6}{n^2} \varphi_4(u_{CG}) (\Psi_C \cos \gamma + \Psi_H \cos 0,5\nu); \quad (46)$$

$$\Psi_H = A_H \Psi_C + m\eta \cdot B_H; \quad (47)$$

$$\Psi_G = A_G \Psi_C + m\eta \cdot B_G, \quad (48)$$

$$\Psi_C = \Phi_\chi \cdot \chi + \Phi_\eta \cdot m\eta. \quad (49)$$

Задаваясь величиной эквивалентной гибкости  $n$ , параметром перемещения верхнего стержневого многогранника  $\chi$ , можно определить параметр перемещения узлов второго яруса  $\eta$ . Подставляя полученные значения в выражение, связывающее параметр распределённой нагрузки и параметры перемещений узлов и величину эквивалентной гибкости, можно вычислить его величину для каждого из полученных параметров:

$$R_0 = \frac{g_0 l}{2\beta^3 EA} = \frac{q_0 \sqrt{3} l^2}{6\beta^3 EA} = \frac{2(\bar{\varepsilon}_{OC}(1-\chi) - \bar{Q}_{OC})}{1 - 24\Phi_g}, \quad (50)$$

где  $q$  – нагрузка, распределённая по площади поверхности купола.

Величина  $R_0$  в выражении (50) является безразмерным параметром равнодействующей распределённой нагрузки по длине стержня.

Полученные для различных величин квадратов эквивалентной гибкости  $n$  для разных величин коэффициента  $m$ , учитывающего начальные несовершенства формы осесимметричного характера, величины верхних критических нагрузок можно представить в виде диаграммы, представленной на рисунке 4.

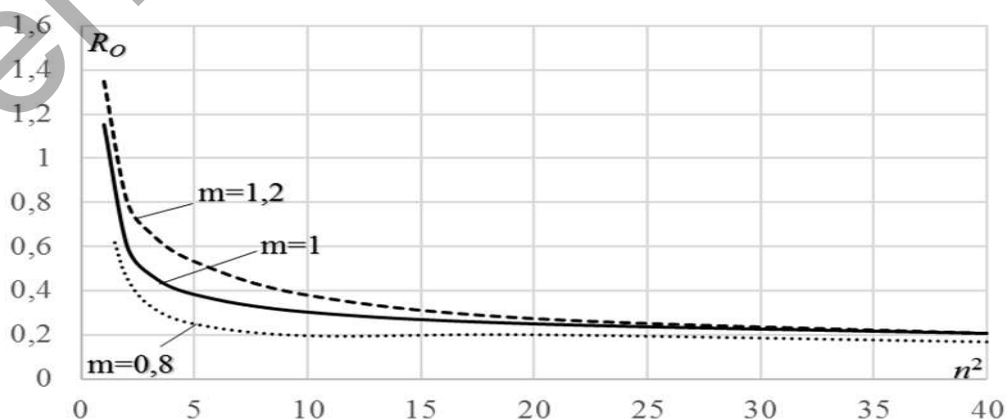


Рисунок 4 – Диаграммы изменения верхних критических нагрузок



Критерием устойчивости сетчатого купола, проявляющейся в «прощёлкивании» его узлов к центру кривизны описанной поверхности, является следующее неравенство:

$$R_o > \frac{q\sqrt{3}l^2}{6\beta^3 EA}, \quad (51)$$

где  $q$  – величина приложенной распределённой по площади нагрузки.

Для проверки устойчивости формы сетчатого купола на основе исходных данных необходимо определить величину эквивалентной гибкости исследуемого стержневого многогранника  $n$  и его форму в плане длины его стержней. При проверке устойчивости формы существующего сетчатого купола, форма которого известна, необходимо определить также коэффициент, учитывающий начальное геометрическое несовершенство формы стержневого многогранника  $m$ , в случае проверки устойчивости формы проектируемого сооружения  $m=1$ . Используя критерий устойчивого состояния в виде неравенства (51), произвести сравнение вычисленного безразмерного параметра распределённой нагрузки с его критическим значением.

**Выводы.** Полученные зависимости, описывающие характер деформирования стержневых многогранников, образующих однослойные сетчатые купола, позволяют учитывать их геометрически нелинейное деформирование, продольно-поперечный изгиб в стержнях и начальные геометрические несовершенства формы осесимметричного характера, что даёт возможность наиболее точно вычислить величину критической распределённой нагрузки.

Предложены графические зависимости изменения безразмерных параметров критических распределённых нагрузок для сетчатых куполов в виде выпуклых стержневых многогранников для различных величин их эквивалентной гибкости. Предложенные графические зависимости позволяют вычислять величины критических распределённых нагрузок, вызывающих потерю устойчивости формы сетчатых куполов с жёсткими узлами. Сформулирован критерий устойчивости формы однослойных сетчатых куполов с жёсткими узлами.

#### Список цитированных источников

1. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем / А. С. Вольмир. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1967. – 948 с.
2. Журавлев, А. А. Прощёлкивание стержневой конструкции сетчатого купола в форме 980-гранника / А. А. Журавлев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1983. – № 6. – С. 34–39.
3. Пиковский, А. Ф. Статика стержневых систем со сжатыми элементами / А. Ф. Пиковский. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1961. – 396 с.
4. Корноухов, Н. В. Прочность и устойчивость стержневых систем / Н. В. Корноухов. – М.: Стройиздат, 1949. – 376 с.
5. Klöppel, K. Zur Berechnung von Netzkuppeln / K. Klöppel, R. Schardt // Der Stahlbau. – 1962. – № 5. – S. 129–136.