УДК 624.014.27

В. И. ДРАГАН., К. К. ГЛУШКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ФРАГМЕНТА ОДНОСЛОЙНОЙ СЕТЧАТОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ДЕЙСТВИИ УЗЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Экспериментально определены значения узловой моментной и силовой отпорностей узлов. Экспериментально определено действительное напряжённо-деформированне состояния фрагмента сетчатого купола. Проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

Введение. В ходе экспериментального исследования изучался вопрос напряжённо-деформированного состояния фрагмента сетчатого геодезического купола. Определение реального напряжённо-деформированного состояния стержней пологих многогранников даёт возможность определить закон деформирования фрагмента сетчатой конструкции и определить критическую нагрузку, при которой произойдёт либо «прощёлкивание» фрагмента, либо пластическое деформирование стержней пологой пирамиды.

Методика проведения эксперимента. Для определения действительного напряжённо-деформированного состояния элементов однослойной сетчатой конструкции, был изготовлен фрагмент сетчатого купола в виде пологой пирамиды с основанием в виде правильного пятиугольника с жёстким соединением стержней узле. Угол наклона радиальных стержней пологого многоугольника составил $1{,}73^{o}$. Длины осей радиальных стержней – 2180мм, реальная длина стержней в радиальных плоскостях конструкции – 1720 мм, длина осей стержней опорного контура составляет 2560мм, реальная длина стержней опорного контура – 2080мм. Материал стержней – сталь 20, тип сечения – труба, внешний диаметр 114мм, толщина стенки 6мм. Общий вид испытываемого фрагмента и обозначение опор показаны на рисунке 1.

Рисунок 1 – Вид фрагмента однослойной сетчатой конструкции

В ходе эксперимента измерялись вертикальные перемещения центрального узла конструкции, осадки опор, деформации сжатия и растяжения в стержнях в радиальной плоскости сетки для вычисления изгибающих моментов и продольных сил.

Узловые элементы фрагмента сетчатой оболочки выполнены из штампованных полых сварных полусфер, к которым жёстко крепились стержни. Для полного описания деформирования конструкции были проведены серии экспериментов по определению значений податливостей (отпорностей) узлов. Так, была измерена моментная отпорность узла, которая приводит к повороту сечения стержня, заделанного в узел.

Рисунок 2 – Вид испытываемой конструкции для определения узловой моментной отпорности

Для этой цели была испытана двухопорная балка с одной шарнирно подвижной и другой шарнирно неподвижной опорами. Узловой элемент был размещён в центре балки. Нагрузка прикладывалась к узлу попеременнос шагом 20 кг и 10 кг при помощи рычага второго рода с отношением плеч 1/8,2425. Деформации между противоположными сечениями сферы в местах прикрепления к ней стержня измерялись многооборотными индикаторами 1МИГ ГОСТ 9696-82 с ценой деления 0,001мм, прогиб балки в центре и осадки опор измерялись прогибомерами 6ПАО с ценой деления 0,01мм. На рисунке 2 показан способ испытания двухпролётной балки с узлом в центре для определения моментной отпорности шара.

Моментная отпорность узла конструкции составила 0,000108 рад/кНм.

Для корректного определения продольной силы в стержнях, была измерена и силовая отпорность узлового элемента. На отдельный узел прикладывалась нагрузка посредством испытательного пресса П-250. Деформации узла измерялись индикатором часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01мм. Упругая работа узла под нагрузкой сохранялась до 52 тонн. Заметное увеличение приращения перемещений от приращения нагрузки произошло с 52 тонн, однако до самой большой приложенной нагрузки в 102 тонны узел не разрушился. После снятия нагрузки остаточные деформации узла составили 25мм. На рисунке 3 показана экспериментальная диаграмма деформирования узла.

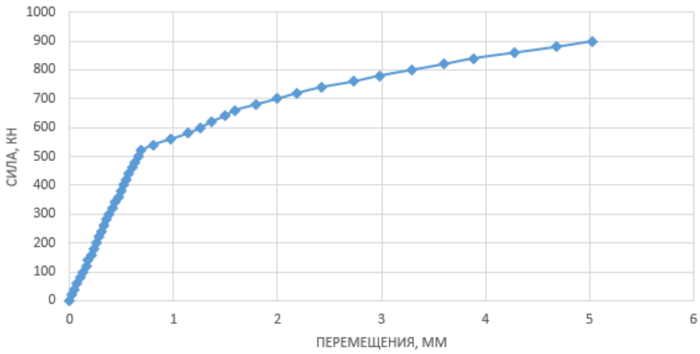

Рисунок 3 – Экспериментальная диаграмма деформирования узла на сжатие

Найденная экспериментально силовая отпорность при упругой стадии работы узла составила 0,001359 мм/кН.

Сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Для сравнения полученных экспериментальных данных с расчётными нужно определить взаимосвязь между моментами в стержнях радиальной плоскости и моментами в стержнях опорного контура. Для определения последних нужно врезать шарниры между опорами и искусственно уравновесить их внешними моментами. Моменты в горизонтальной плоскости каждого из стержней не развиваются в процессе деформации, поскольку углы между стержнями в проекции на горизонтальную плоскость не меняются. Таким образом, из трёх моментов (два изгибающих и один крутящий) требуется определить один момент в радиальной плоскости фрагмента сетчатого купола. На рисунке 4 показана расчётная схема стержня опорного контура.

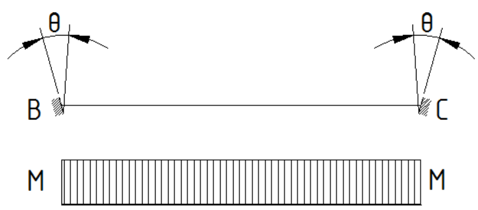

Рисунок 4 – Расчётная схема стержней опорного контура

Стержень опорного контура испытывает чистый изгиб с растяжением. При чистом изгибе системы супруго-податливыми узлами поворот сечений можно выразить следующей формулой:

$$\theta = M\left(\frac{c}{EI} + r_u\right), \tag{1}$$

где M – момент в стержне BC, c – проекция стержня на горизонтальную плоскость (плоскость центров опорных узлов), E – модуль упругости, I – момент инерции стержня.

Теперь угол поворота φ стержняAB можно выразить через угол поворота торцов стержня ВС θ.

$$\theta = \varphi \cos 54^{o} , \qquad (2)$$

где $\cos 54^{o}$ – косинус угла между стержнем *АВ* и *ВС*.

Момент в точке В стержня*АВ* связан с моментами стержней типа *ВС*. Выражая момент в стержне АВ через равновесие моментов в узле, выражение (2) можно переписать в следующем виде:

$$\phi = \frac{M_{BC}}{2}\left(\frac{c}{EI} + r_u\right) + M_{BC} r_u \, . \qquad (3)$$

Так, отпорность опоры *В* фрагмента в направлении стержня *АВ* в вертикальной плоскости можно определить следующим образом

$$r_B = \frac{1}{2}\left(\frac{c}{EI} + r_u\right) + r_u \, . \qquad (4)$$

Моментная отпорность r_B узла *А* для стержня *АВ* будет равна только моментной отпорности r_u, поскольку поворота узла *А* не происходит, поскольку этот узел находится на вертикальной оси симметрии.

Необходимо учесть, что стержень, являясь упругим телом, находится между двумя упругими телами (узлами) и двумя условно жёсткими деталями крепления стержня к узлу. Необходимо рассмотреть процесс перемещения опор стержня фрагмента, взяв натурные длины стержня *АВ* и подобным ему. При определении продольной силы в стержне необходимо брать не длину между точками пересечения осей стержней, а длину реальную.

Отпорность $\delta_{АЭ}$ вызвана наибольшей мере продольной деформацией стержней опорного контура рассматриваемого фрагмента. Поскольку в геодезическом куполе длины стержней между собой значительно не отличаются, то можно записать следующее выражение для определения силовой отпорности опорных узлов фрагмента как самостоятельной конструкции, так и в составе некоторого сооружения:

$$\delta_{АЭ} \approx \delta_A \frac{c_1}{c} , \qquad (5)$$

где *c* – длина оси стержня, м.

Так, формула (5) даёт возможность вычислить продольную силу в стержне с учётом узловой и силовой податливости:

$$N = EA\beta^2 \xi (1 - \frac{1}{2}\xi) \Big/ \left(1 + \frac{EA}{c_1}\left(\delta_{АЭ} + \delta_u\right)\right). \qquad (6)$$

Здесь c_1 – реальная длина стержня, м, δ_u – значение силовой отпорности узла, м/Н, $\delta_{АЭ}$ – значение силовой эквивалентной отпорности опор фрагмента в осевой расчётной схеме и узла соответственно, м/Н.

На рисунке 5 показаны графики изменения продольных сил и изгибающих моментов в стержнях типа *АВ* фрагмента, полученных в ходе эксперимента и вычисленных.

Максимальная погрешность между экспериментальными и вычисленными значениями продольной силы составляет 4 %. Так же была определена зависимость между прогибом и продольной силой для системы с абсолютно жёсткими узлами (график «$N_{жёстк}$» на рисунке 5). Использование таких явно завышенных значений продольных сил может привести к ложному выводу о том, что система уравновеситсяпри гораздо меньших деформациях, таким образом, точка разделения равновесных состояний может быть пройдена

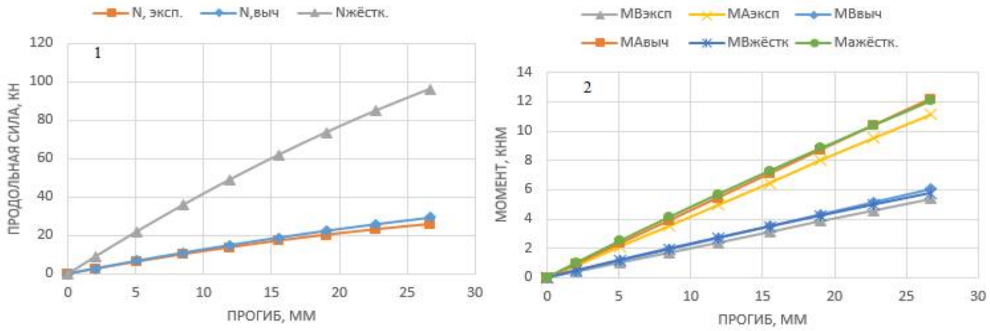

Рисунок 5 – Графики изменения продольных сил и моментов в стержне *AB*

.

При рассмотрении работы данный конструкции без учёта узловой моментной отпорности ($MA_{\text{жёстк}}$, $MB_{\text{жёстк}}$ на рисунке 5), можно сделать вывод, что она практически не влияет на значения моментов. Таким образом, для определения моментов и поперечных сил, узлы можно считать абсолютно жёсткими.

Взаимосвязь между нагрузкой и перемещением вертикального узла описывается следующей формулой:

$$P = 5EA\beta^3 \frac{\xi\left(1 - \frac{1}{2}\xi\right)}{1 + \frac{EA}{c_1}\left(\delta_{AЭ} + \delta_u\right)}\left(1 - \xi\right) + \frac{5\beta\xi\left(\frac{6i}{c} + N\right)\left(2 + 2i(r_A + r_B) + Nc(r_A + r_B)\right)}{\left(1 + 4ir_A + Ncr_A\right)\left(1 + 4ir_B + Ncr_B\right) - 4i^2 r_A r_B} > P_{уз}. \quad (7)$$

На рисунке 6 показаны вычисленные и экспериментальная диаграммы деформирования фрагмента сетчатой конструкции.

Максимальная погрешность между экспериментальными и вычисленным значением нагрузок при заданных перемещениях ($P_{\text{эксп}}$, $P_{\text{выч}}$) составила 10 %. График $P_{\text{жёстк}}$ построен для системы с абсолютно жёсткими узлами. Здесь видно, что разница прогибов при максимальной экспериментальной нагрузке 40 кН между реальной системой и системой с абсолютно жёсткими узлами составляет почти 7 мм при максимальном среднем прогибе конструкции 26,68мм. Разница деформаций при сравнении экспериментальной диаграммы «нагрузка-прогиб» и диаграммы, полученной для системы с податливыми узлами, составляет около 2 мм. Таким образом, учёт деформативности узловых элементов и реальных длин стержней конструкции даёт возможность более достоверно описать поведение фрагмента сетчатой конструкции под внешней нагрузкой.

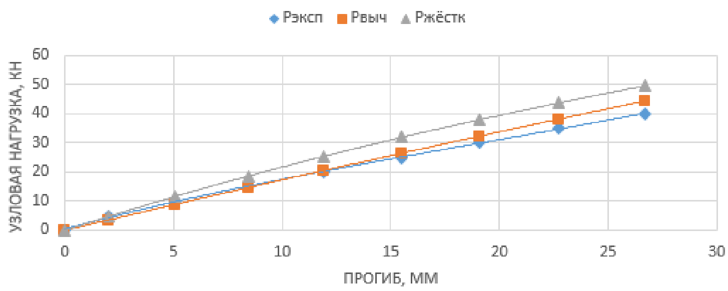

Рисунок 6 – Диаграмма деформирования фрагмента сетчатой конструкции

Выводы:

- произведено сравнение экспериментальных и теоретических значений внутренних сил и перемещений фрагмента сетчатого купола с упруго-податливыми узлами при узловой нагрузке,
- полученные результаты позволяют с хорошей точностью описать процесс деформации пологих многогранников в составе сетчатого купола, производить расчёт на местную устойчивость.

Experimentally determined tense and strained state of the dome fragment. The proposed method has a good agreement with the experimental results.

Список литературы

1. Борисевич, А. А. Строительная механика / А. А. Борисевич, Е. М. Сидорович, В. И. Игнатюк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн. : БНТУ, 2009. – 756 с.