

УДК 624.04

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СОСТАВНЫХ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ**Гинзбург Никита Сергеевич,**

Студент (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет)

E-mail: ginzburg.nik@mail.ru

Аннотация

В статье представлены результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) составных полигональных железобетонных оболочек. Актуальность работы обусловлена широким применением большепролетных оболочечных конструкций в современном строительстве и необходимостью оптимизации их геометрических параметров. Исследование выполнено с использованием программного комплекса «ЛИРА-САПР» на основе метода конечных элементов (МКЭ). Рассмотрено влияние трех ключевых геометрических параметров: величины пролета, стрелы подъема и количества лепестков. Установлены закономерности изменения изгибающих моментов и усилий в оболочке. Выявлено, что увеличение пролета приводит к росту сжимающих усилий до 70%, увеличение стрелы подъема снижает сжимающие напряжения N_x , но увеличивает N_y , а рост количества лепестков существенно повышает значения растягивающих напряжений в зонах их сопряжения. Полученные результаты позволяют рекомендовать наиболее рациональные конструктивные схемы для проектирования большепролетных покрытий.

Ключевые слова: составные полигональные оболочки, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов (МКЭ), «ЛИРА-САПР», большепролетные конструкции, геометрические параметры, параметрический анализ.

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPOSITE POLYGONAL REINFORCED CONCRETE SHELLS UNDER VARYING GEOMETRIC PARAMETERS**Ginzburg Nikita Sergeevich,**

Student, Novozhilov Natalia Sergeevna, candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: ginzburg.nik@mail.ru

ABSTRACT

This article presents the results of a numerical study of the stress-strain state (SSS) of composite polygonal reinforced concrete shells. The relevance of the work is due to the widespread

use of long-span shell structures in modern construction and the need to optimize their geometric parameters. The study was performed using the LIRA-SAPR software package based on the finite element method (FEM). The influence of three key geometric parameters is considered: span length, rise height, and the number of petals. Patterns of changes in bending moments and forces in the shell are established. It was found that an increase in the span leads to an increase in compressive forces by up to 70%, an increase in the rise reduces compressive stresses N_x but increases N_y , and an increase in the number of petals significantly increases tensile stresses in the areas of their conjugation. The obtained results allow recommending the most rational structural schemes for the design of long-span coverings.

Keywords: composite polygonal shells, stress-strain state, finite element method (FEM), LIRA-SAPR, long-span structures, geometric parameters, parametric analysis.

Эффективность работы составных полигональных оболочек во многом определяется их геометрической формой, которая характеризуется такими параметрами, как пролет, стрела подъема и количество лепестков. Несмотря на наличие классических работ в области теории тонкостенных пространственных конструкций [1–3], вопросы влияния этих параметров на НДС современных составных полигональных оболочек изучены недостаточно. Существующие исследования, как правило, носят частный характер и не позволяют выявить общие закономерности.

Целью данной работы является анализ влияния изменения пролета, стрелы подъема и количества лепестков на напряженно-деформированное состояние составной полигональной железобетонной оболочки.

За исходную модель, которую будем сравнивать с остальными вариантами принята оболочка с пролетом 60 м, стрелой подъема 12 м и толщиной 0,2 м. Бетон класса В25, арматура класса А500С. Объектом исследования является составная шестилепестковая железобетонная оболочка, полигональная в плане (рис. 1).

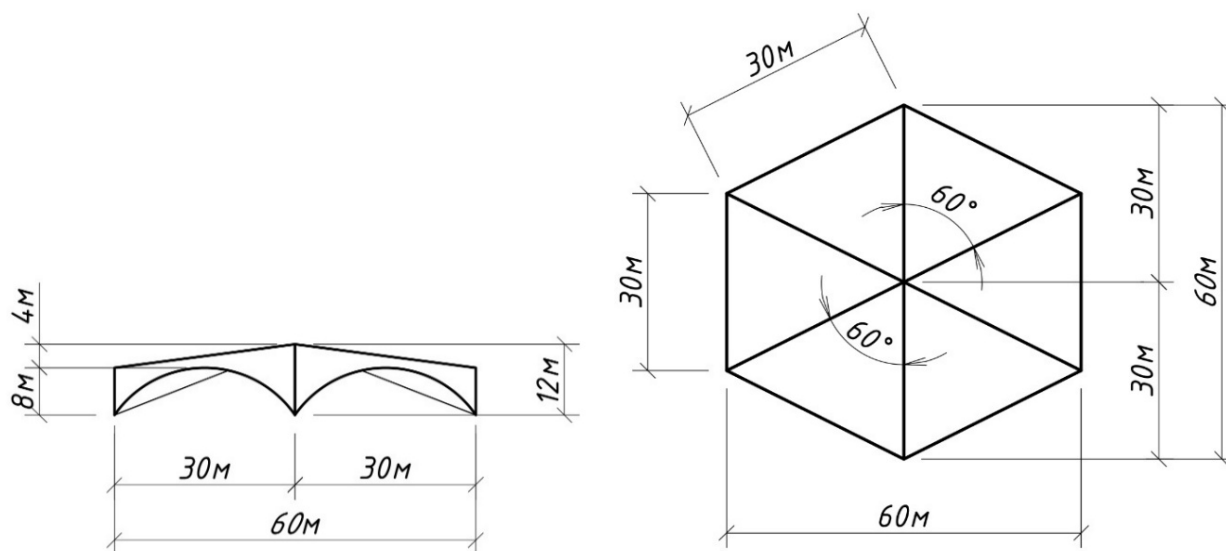


Рис.1 Схема геометрических размеров исходной оболочки (1 вариант). [разработано автором]

Численное моделирование выполнено в программном комплексе «ЛИРА-САПР» с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Расчетная схема оболочки предусматривает жесткое закрепление опорных узлов по контуру. В ходе исследования варьировались следующие параметры, смотреть таблицу 1.

Таблица 1. Геометрические параметры. [разработано автором]

Геометрический параметр	1 вариант	2 вариант	3 вариант	4 вариант
Длина пролета	60	70	80	100
Стрела подъема	12	14	16	18
Количество лепестков	6	8	10	

Нагрузки, приложенные к оболочкам, включали собственный вес конструкции, вес кровельного пирога, снеговую и ветровую нагрузки в соответствии с СП 20.13330.2016 [4]. Исходя из сложной формы оболочки были рассмотрены различные схемы распределения снеговой нагрузки [4]. Таким образом анализ результатов был произведен для 6 вариантов сочетаний нагрузок.

Результаты

1) Изменение длины пролетов оболочек.

Сравнительный анализ полученных данных в результате расчетов оболочки для различных длин пролета в плане представлен в табл. 2.

Таблица 2. Значения напряжений в оболочках при изменении длины пролета. [разработано автором]

Длина пролета оболочки, м	Напряжение Nx (по загрузкам)						Напряжение Ny (по загрузкам)					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6
60	22,9	23,6	23,6	28,2	28,2	23,0	18,8	21,1	21,1	21,4	21,3	14,6
	-898	-867	-867	-865	-866	-866	-687	-693	-693	-693	-694	-687
70	36,4	36,4	36,6	36,8	36,4	36,6	32,6	42,8	42,8	42,8	50,6	29,9
	-1050	-1060	-1060	-1070	-1070	-1090	-897	-879	-879	-879	-882	-848
80	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	21,4	23,9	23,9	24,1	24,1	15,4
	-1180	-1140	-1140	-1160	-1150	-1160	-982	-954	-960	-962	-962	-948
100	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,77	27,8	30,8	30,8	31,2	31,2	19,5
	-1380	-1270	-1270	-1380	-1330	-1420	-1410	-1330	-1330	-1290	-1290	-1320

С увеличением длины пролета оболочки возрастают сжимающие напряжения, причем с увеличением пролета на 10 метров, величина сжимающих напряжений возрастает на 10-15%. С другой стороны, зависимость между растягивающими напряжениями проследить трудно, сначала они увеличивались (в оболочке с пролетом 70 м), а потом стали уменьшаться (в оболочках 80 и 100 метров). Растягивающие напряжения Nx почти полностью исчезли. Также можно отметить, что с увеличением пролета сжимающие напряжения Nx и Ny становятся близкими по значениям, это можно увидеть на примере оболочки пролетом 60 метров и 100 метров.

За «1» приняты результаты напряжений для оболочки с наименьшими размерами в плане (60 м). При увеличении размеров рассматриваемой оболочки с 60 м до 100 м максимальные значения напряжений сжатия увеличиваются (в 1,25, 1,36, 1,73 раза – это средние значения среди напряжений Nx и Ny для всех загрузок) от первоначальных значений. Напряжение растяжения рассматривать не будем, так как их значения нельзя

систематизировать, и они очень малы по сравнению с сжимающими напряжениями. Сравнение изменений напряжений в оболочках разного пролета представлены в табл.3 и на рис. 2 и 3.

Таблица 3. Изменение напряжений в оболочках при изменении длины пролета. [разработано автором]

Длина пролета оболочки, м	Напряжение Nx (по загрузениям)						Напряжение Ny (по загрузениям)					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6
60	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
70	1,17	1,22	1,22	1,24	1,24	1,26	1,31	1,27	1,27	1,27	1,27	1,23
80	1,31	1,31	1,31	1,34	1,33	1,34	1,43	1,38	1,39	1,39	1,39	1,38
100	1,54	1,46	1,46	1,60	1,54	1,64	2,05	1,92	1,92	1,86	1,86	1,92

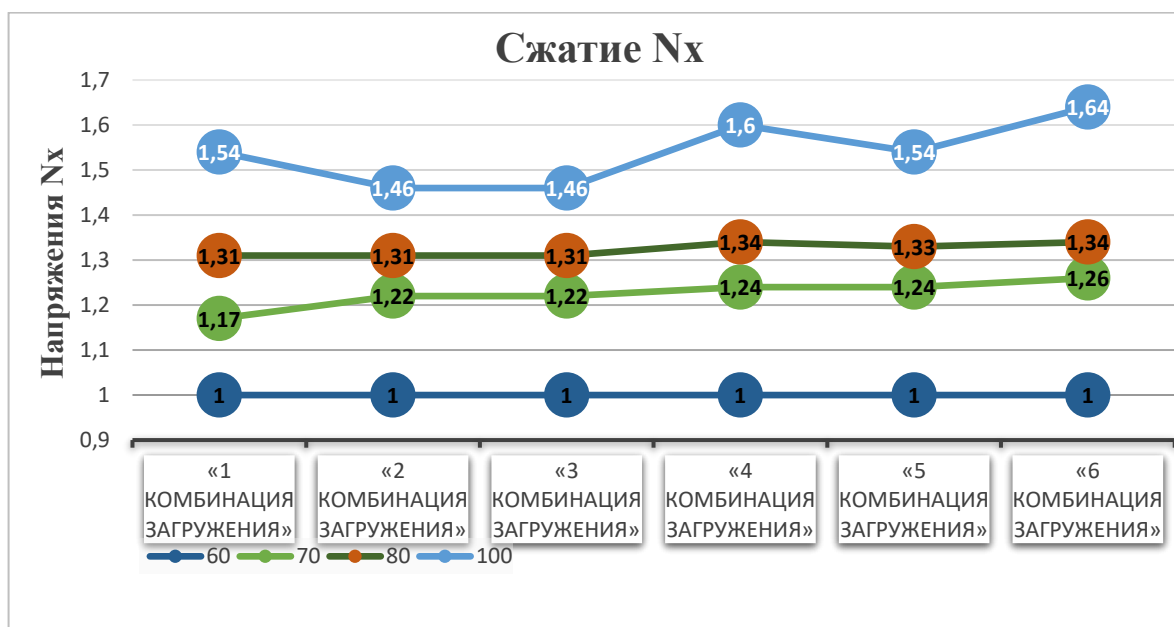


Рис.2. График зависимости напряжений сжатия Nx от пролета оболочки. [разработано автором]

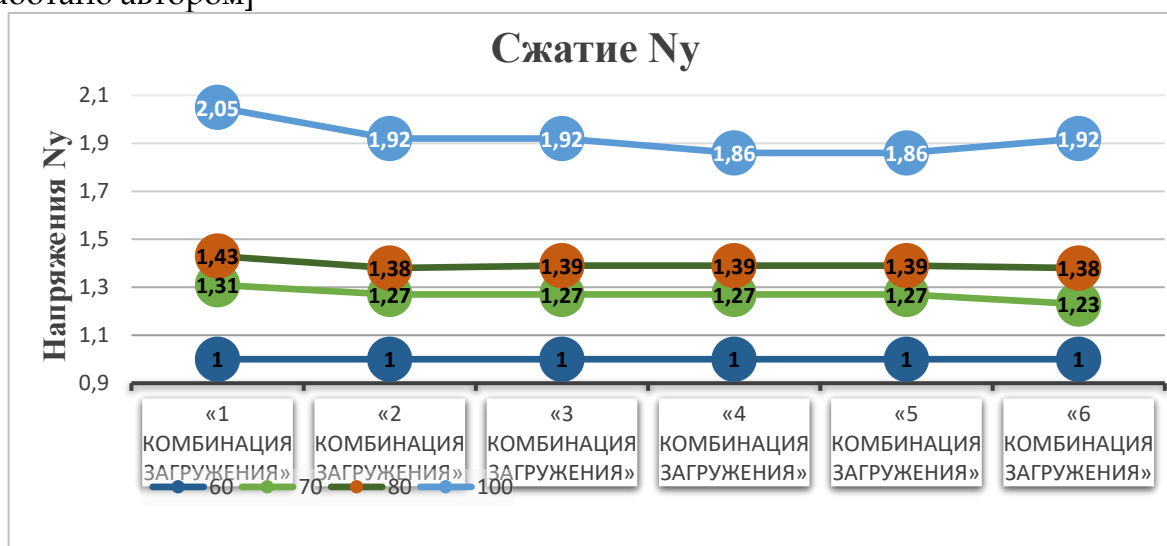


Рис.3. График зависимости напряжений сжатия N_y от пролета оболочки.
[разработано автором]

2) Изменение стрелы подъема оболочки

Сравнительный анализ полученных данных в результате расчетов оболочки для различных значений стрелы подъема представлен в табл. 4.

Таблица 4. Значения напряжений в оболочках при изменении стрелы подъема.
[разработано автором]

Стрела подъема оболочки, м	Напряжение N_x (по загрузениям)						Напряжение N_y (по загрузениям)					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6
12	22,9	23,6	23,6	28,2	28,2	23,0	18,8	21,1	21,1	21,4	21,3	14,6
	-898	-867	-867	-865	-866	-866	-687	-693	-693	-693	-694	-687
14	14,3	28,4	28,4	32,3	32,4	14,3	18,6	20,9	20,9	21,1	21,0	18,6
	-858	-856	-856	-832	-830	-826	-706	-700	-700	-705	-708	-684
16	11,5	24,4	24,4	27,8	27,9	27,8	18,2	20,5	20,5	20,6	20,6	18,2
	-816	-798	-798	-787	-787	-852	-719	-739	-739	-725	-731	-720
18	7,51	16,4	16,4	19,1	19,1	16,4	17,8	20,0	19,9	20,0	20,0	17,8
	-768	-736	-736	-720	-720	-763	-792	-768	-768	-760	-769	-744

С увеличением длины пролета оболочки возрастают сжимающие напряжения, причем с увеличением пролета на 10 метров, величина сжимающих напряжений возрастает на 10-15%. С другой стороны, зависимость между растягивающими напряжениями проследить трудно, сначала они увеличивались (в оболочке с пролетом 70 м), а потом стали уменьшаться (в оболочках 80 и 100 метров). Растягивающие напряжения N_x почти полностью исчезли. Также можно отметить, что с увеличением пролета сжимающие напряжения N_x и N_y становятся близкими по значениям, это можно увидеть на примере оболочки пролетом 60 метров и 100 метров.

За «1» приняты результаты напряжений для оболочки с наименьшей стрелой подъема (12 м). При увеличении стрелы рассматриваемой оболочки с 12 м до 18 м максимальные значения напряжений N_x сжатия уменьшаются (в 0,97, 0,93, 0,85 раза – это средние значения среди напряжений N_x для всех загрузений) от первоначальных значений. Максимальные значения напряжений N_y сжатия увеличиваются (в 1,01, 1,05, 1,11 раза – это средние значения среди напряжений N_y для всех загрузений) от первоначальных значений. Напряжение растяжения рассматривать не будем, так как их значения практически не изменяются, и они очень малы по сравнению с сжимающими напряжениями. Сравнение изменений напряжений в оболочках разного пролета представлены в табл. 5 и на рис. 4 и 5.

Таблица 5. Изменение напряжений в оболочках при изменении стрелы подъема.
[разработано автором]

Стрела подъема	Напряжение N_x (по загрузениям)	Напряжение N_y (по загрузениям)
----------------	-----------------------------------	-----------------------------------

оболочки, м	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	0,96	0,99	0,99	0,96	0,96	0,95	1,03	1,01	1,01	1,02	1,02	1,00
16	0,91	0,92	0,92	0,91	0,91	0,98	1,05	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05
18	0,86	0,85	0,85	0,83	0,83	0,88	1,15	1,11	1,11	1,10	1,11	1,08

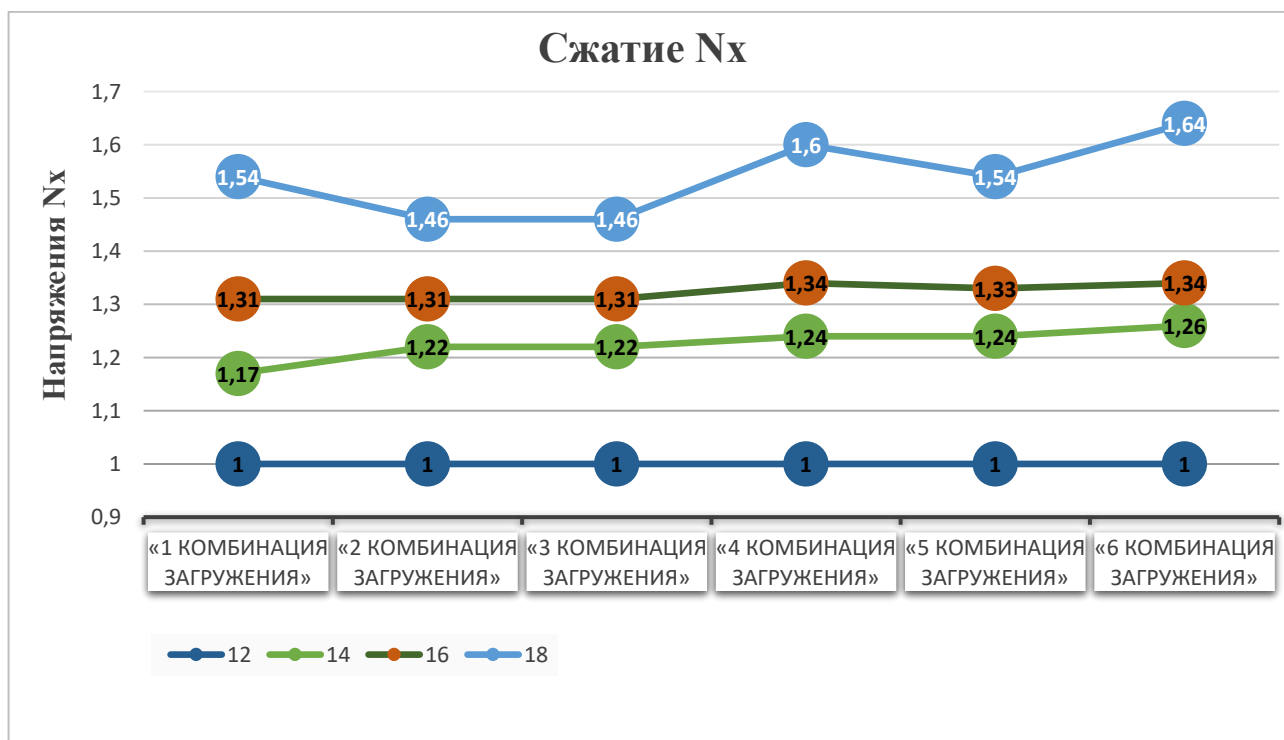


Рис.4. График зависимости напряжений сжатия Nx от стрелы подъема. [разработано автором]

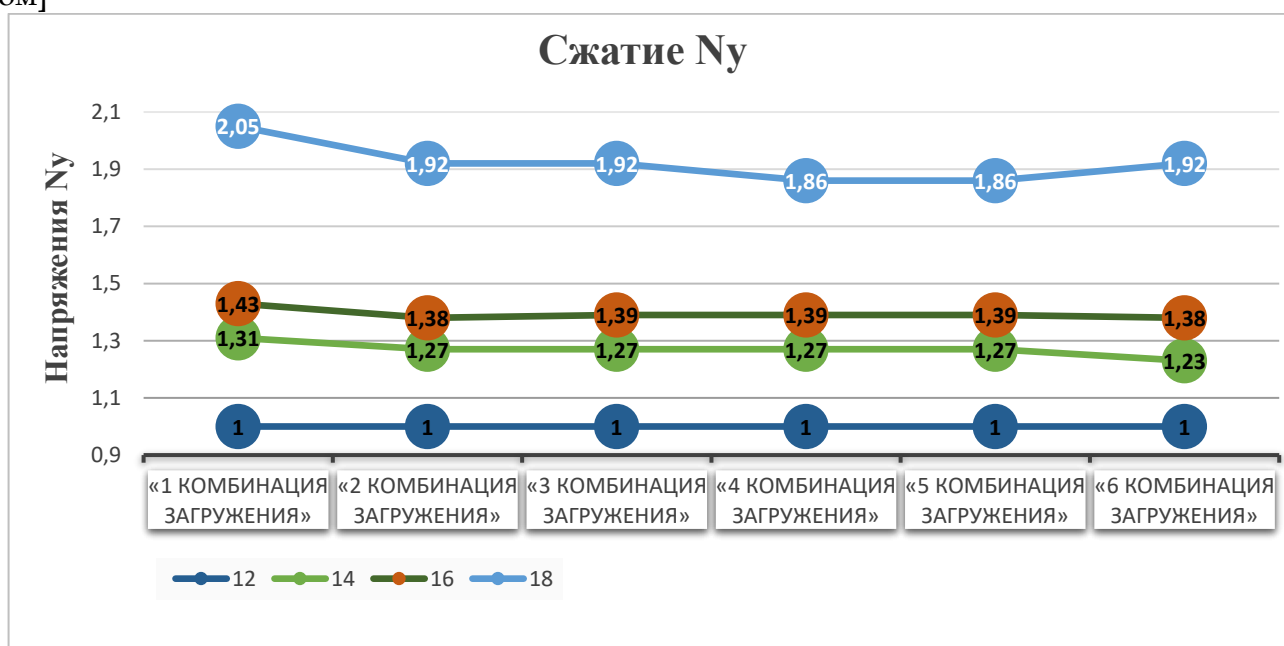


Рис.5. График зависимости напряжений сжатия Ny от стрелы подъема. [разработано автором]

3) Изменение количество лепестков оболочек.

Сравнительный анализ полученных данных в результате расчетов оболочки для различного количества лепестков представлен в табл. 6.

Таблица.6. Значения напряжений в оболочках при изменении количества лепестков

Количество лепестков, шт	Напряжение Nx (по загрузениям)						Напряжение Ny (по загрузениям)					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6
6	22,9	23,6	23,6	28,2	28,2	23,0	18,8	21,1	21,1	21,4	21,3	14,6
	-898	-867	-867	-865	-866	-866	-687	-693	-693	-693	-694	-687
8	59,6	94,6	94,5	94,6	94,5	59,7	16,8	19,6	19,6	19,6	19,6	14,3
	-1030	-998	-1000	-999	-1000	-1100	-910	-855	-858	-858	-858	-855
10	147	182	182	184	184	147	23,0	29,2	29,2	29,3	29,3	23,3
	-1070	-1020	-1020	-1025	-1025	-1070	-885	-925	-925	-930	-930	-874

С увеличением количества лепестков оболочки значения сжимающих напряжений увеличиваются в среднем на 20-30%. Причем сжимающие напряжения получились практически одинаковыми у оболочек с 8 и 10 лепестками. Однако очень сильно увеличились растягивающие напряжений Nx в местах стыков лепестков, для оболочки с 8 лепестками напряжения возросли в 3 раза, а для оболочки с 10 лепестками в 6 раз. Напряжения растяжения Ny изменяются не так логично, в оболочке с 8 лепестками они уменьшились на 5%, а в оболочке с 10 лепестками они увеличились на 40% по сравнению с исходной оболочкой. Однако напряжения растяжения Ny все равно остаются небольшими.

За «1» приняты результаты напряжений для оболочки с наименьшим количеством лепестков (6 шт). При увеличении количества лепестков рассматриваемой оболочки с 6 шт до 10 шт максимальные значения напряжений Nx сжатия увеличиваются (в 1,17, 1,19 раза – это средние значения среди напряжений Nx для всех загрузений) от первоначальных значений. Максимальные значения напряжений Nx растяжения увеличиваются (в 3,32, 6,88 раза – это средние значения среди напряжений Nx для всех загрузений) от первоначальных значений. Максимальные значения напряжений Ny сжатия увеличиваются (в 1,25, 1,32 раза – это средние значения среди напряжений Ny для всех загрузений) от первоначальных значений. Максимальные значения напряжений Ny растяжения изменяются (в 0,93, 1,39 раза – это средние значения среди напряжений Ny для всех загрузений) от первоначальных значений.

Сравнение изменений напряжений в оболочках с разным количеством лепестков представлены в табл. 7, 8 и на рис. 6 - 9.

Таблица 7. Изменение напряжений растяжения в оболочках при изменении кол. лепестков. [разработано автором]

Количество лепестков, шт	Напряжение Nx (по загрузениям)						Напряжение Ny (по загрузениям)					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6

6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	2,60	4,01	4,00	3,35	3,35	2,60	0,89	0,93	0,93	0,92	0,92	0,98
10	6,42	7,71	7,71	6,52	6,52	6,39	1,22	1,38	1,38	1,37	1,38	1,60

Таблица 8. Изменение напряжений сжатия в оболочках при изменении кол. лепестков. [разработано автором]

Количество лепестков, шт	Напряжение Nx (по загрузениям)						Напряжение Ny (по загрузениям)					
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№1	№2	№3	№4	№5	№6
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,27	1,32	1,23	1,24	1,24	1,24	1,24
10	1,19	1,18	1,18	1,18	1,18	1,24	1,29	1,33	1,33	1,34	1,34	1,27

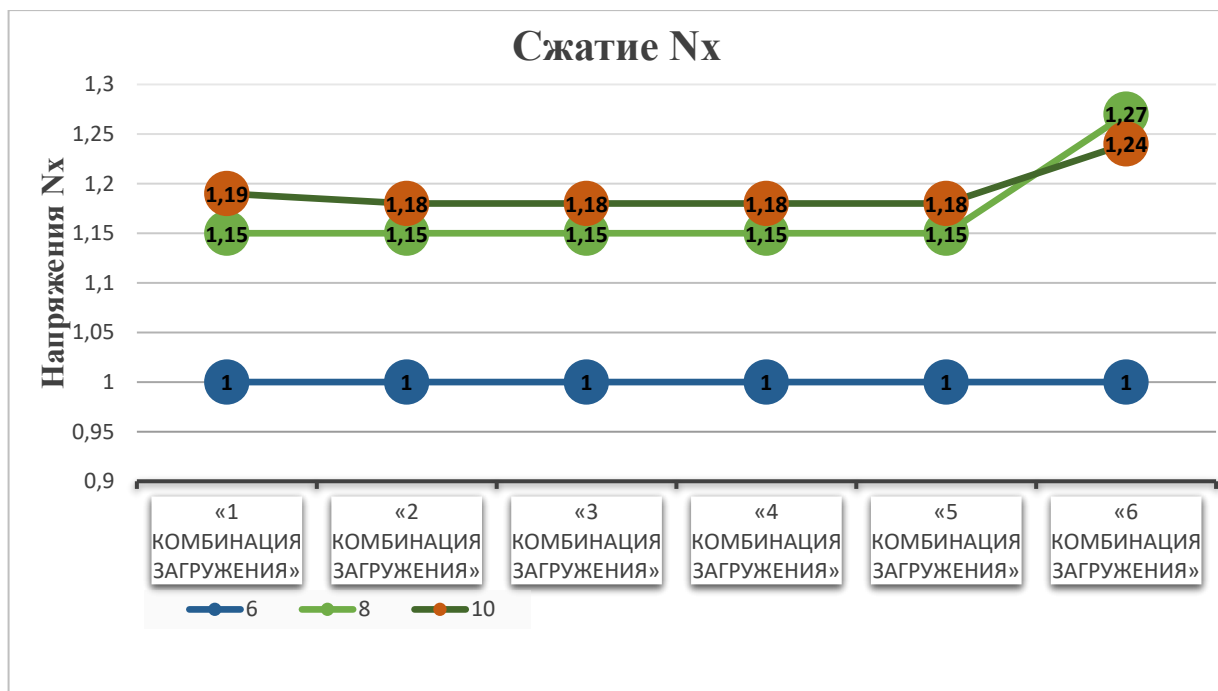


Рис.6. График зависимости напряжений сжатия Nx от количества лепестков. [разработано автором]

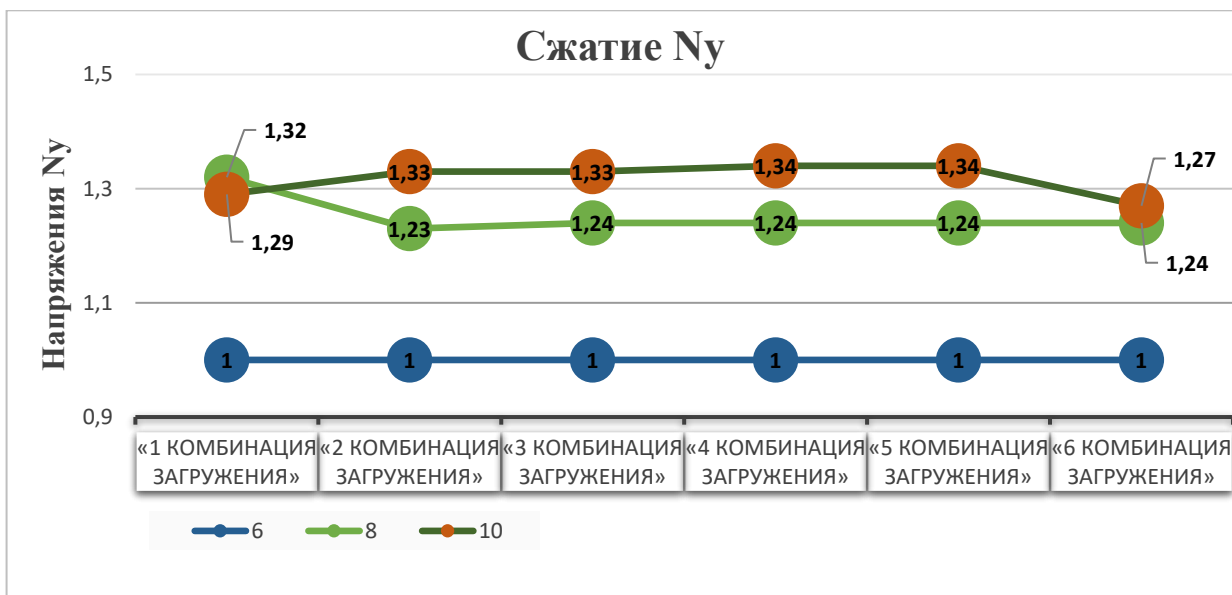


Рис.7. График зависимости напряжений сжатия Ny от количества лепестков. [разработано автором]

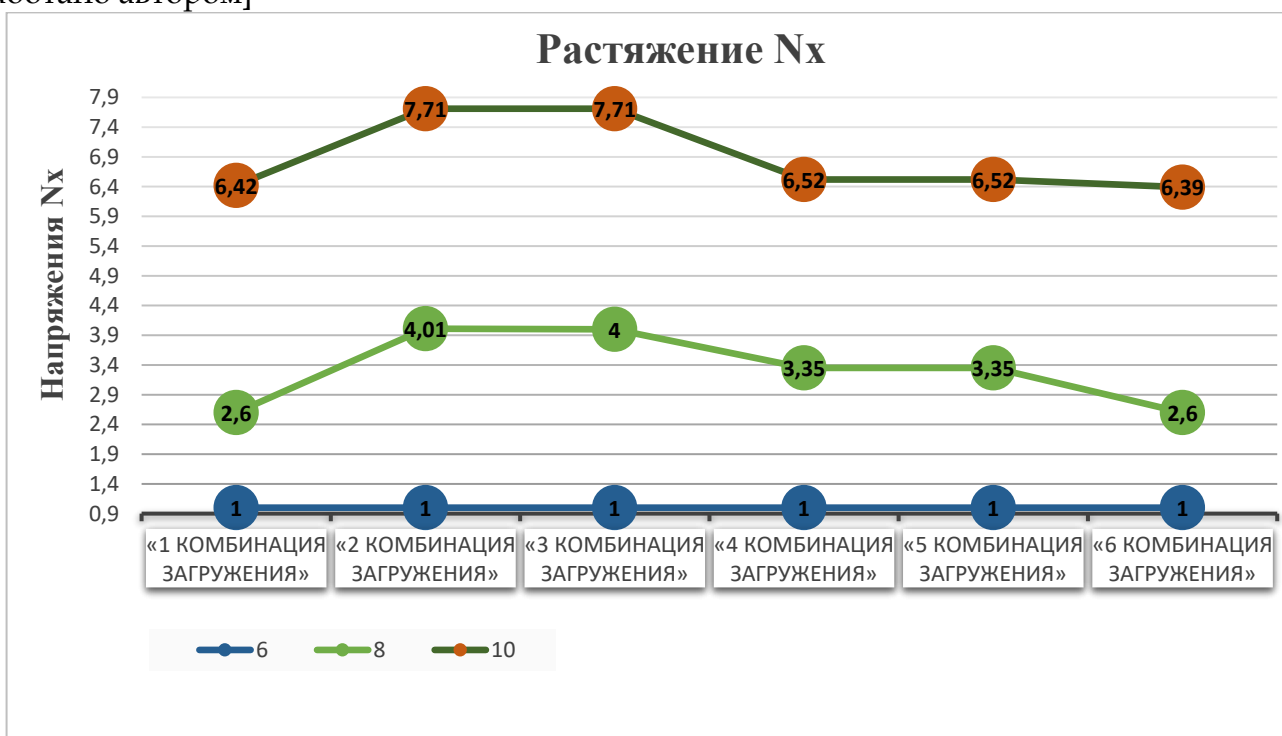


Рис.8. График зависимости напряжений растяжения Nx от количества лепестков. [разработано автором]

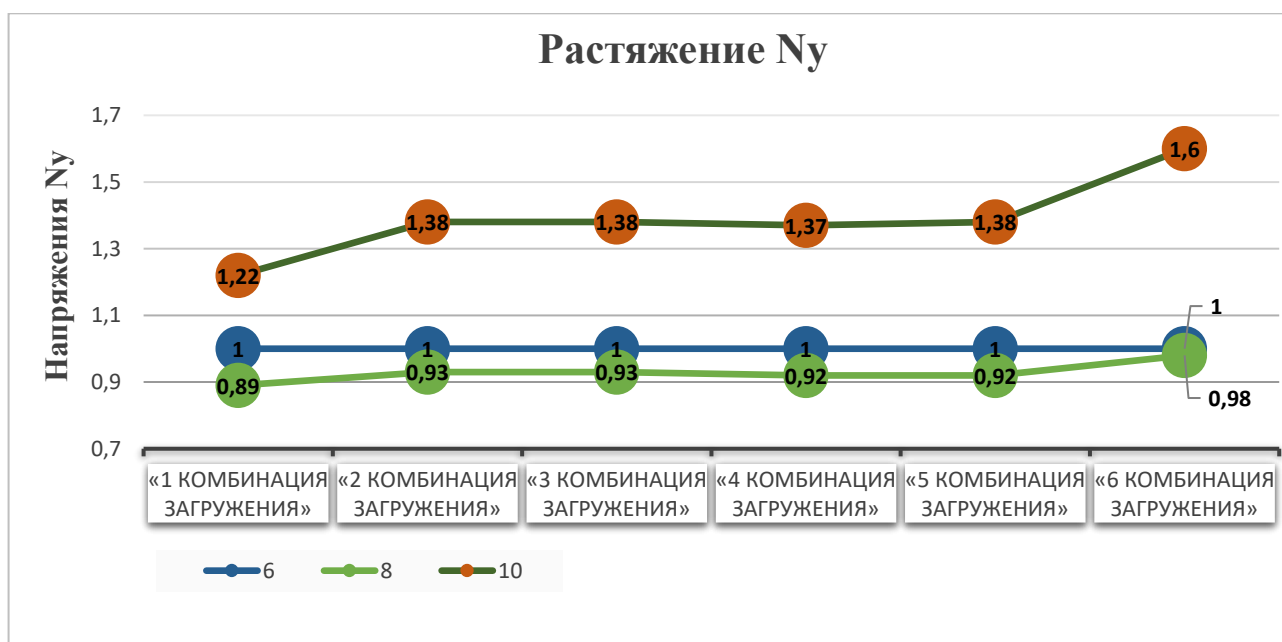


Рис.9. График зависимости напряжений растяжения N_y от количества лепестков.
[разработано автором]

Заключение

В результате проведенного численного исследования составных полигональных железобетонных оболочек установлено следующее:

1. Пролет является ключевым параметром, определяющим уровень напряжений. При увеличении пролета с 60 до 100 м сжимающие усилия возрастают до 70%, что требует увеличения толщины оболочки или класса бетона.
2. Стрела подъема оказывает сложное влияние: увеличение высоты снижает сжимающие усилия N_x , но увеличивает N_y , что необходимо учитывать при проектировании для обеспечения равнопрочности.
3. Количество лепестков существенно влияет на работу узлов сопряжения. При увеличении их числа более 8 наблюдается резкий рост растягивающих напряжений в стыках, что может потребовать специальных конструктивных решений (утолщений, развитого армирования).
4. Наиболее рациональной с точки зрения напряженного состояния среди рассмотренных является 6-лепестковая оболочка с пролетом 60 м и стрелой подъема 12 м. Для большепролетных сооружений (свыше 80 м) и оболочек с большим количеством лепестков рекомендуется выполнять более детальный анализ прочности и жесткости.

Список литературы:

1. Дыховичный Ю. А., Жуковский Э. З. Пространственные составные конструкции: Учеб. пос. для студ. по спец. «Пром. и гражд. строит.» — М.: Высш. шк., 1989. — 288 с.: ил.
2. Околичный В.Н. Несущая способность тонкостенных железобетонных секториальных оболочек, полигональных в плане. — М., 1984. — 197 с.
3. Журавлева Е.В., Дзюба В.А. Эффективные тонкостенные железобетонные оболочки переменной жесткости // Сборник трудов конференции. — 2020. — С. 206–208.

4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Минстрой России, 2016. – 80 с.

References:

1. Dykhovichny Yu. A., Zhukovsky E. Z. Spatial Composite Structures: Textbook for Students of the Specialty "Industrial and Civil Engineering" – Moscow: Higher School, 1989. – 288 p.: ill.
2. Okolochny V. N. Bearing Capacity of Thin-Walled Reinforced Concrete Sectoral Shells, Polygonal in Plan. – Moscow, 1984. – 197 p.
3. Zhuravleva E. V., Dzyuba V. A. Effective Thin-Walled Reinforced Concrete Shells of Variable Stiffness // Conference Proceedings. – 2020. – pp. 206–208.
4. SP 20.13330.2016 Loads and Impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85*. – М.: Ministry of Construction of Russia, 2016. – 80 p.