

УДК 69.04

Дияб В.

магистрант

*2 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

Уразаев А. К.

магистрант

*2 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

Нашер М.Х.А.

Аспирант

*1 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

Угаис М.М.А.

Аспирант

*1 курс, Инженерная академия «Кафедра технологий строительства и
конструкционных материалов»*

Российский Университет Дружбы Народов

Россия, г. Москва

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В SCAD С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ГИПОТЕЗ РАБОТЫ СЛОЕВ

В статье представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойной параболической цилиндрической оболочки с использованием программного комплекса SCAD. Проведен сравнительный анализ двух типов схем (тип 8 и тип 9) с учетом различных гипотез работы слоев: обжатия и межслоевого сдвига. Исследование включало статическую нагрузку от собственного веса конструкции и снегового воздействия. Наибольшие напряжения наблюдались в варианте с модульными панелями (тип схемы 9), что подтверждает значительное влияние межслоевых взаимодействий на НДС. Полученные результаты работы могут быть успешно использованы для дальнейшей оптимизации проектирования оболочечных конструкций с применением современных численных методов и компьютерного моделирования.

Ключевые слова: конечный элемент, многослойная оболочка, параболическая цилиндрическая оболочка, SCAD, межслоевой сдвиг.

This paper presents the results of a study on the stress-strain state (SSS) of a multilayer parabolic cylindrical shell using the modern SCAD software complex. A comparative analysis of two types of schemes (Type 8 and Type 9) was conducted, taking into account different layer behavior hypotheses: compression and interlaminar shear. The study included static loads from the structure's self-weight and snow impact. The highest stresses were observed in the variant with modular panels (Type 9 scheme), confirming the significant influence of interlaminar interactions on the SSS. The obtained results can be effectively used for further optimization of shell structure design through modern numerical methods and computer modeling.

Keywords: finite element, multilayer shell, parabolic cylindrical shell, SCAD, interlaminar shear.

Введение

Оболочечные конструкции популярны в архитектуре и промышленности благодаря изучению их геометрии, формообразования и напряженного состояния с помощью численных методов и современных программ [1-3]. Наиболее популярны оболочки с цилиндрическими и коническими поверхностями [4,5].

Материалы и методы

В данной работе рассматривается анализ параметров НДС многослойной параболической цилиндрической оболочки в программном комплексе SCAD представлена на (рис. 1) с размерами в плане – $d \times L$, шириной $d = 2c$, $c = 7,5$ м, длиной $L = 20$ м, высотой $h = 6$ м, толщиной 8 см, под действием собственного веса конструкций и снеговой нагрузкой [6]. Для подобного расчета SCAD обладает двумя типами схемы и соответствующими им двумя наборами оболочечных конечных элементов: тип схемы 8 – конструкции из многослойных оболочек Тип 8 – Конструкции из многослойных оболочек (КЭ №71-74). Схема может иметь любое положение в пространстве. К шести степеням свободы признака 5 добавлены шесть их аналогов: A_X , A_Y , A_Z и B_X , B_Y , B_Z . Дополнительные степени свободы учитывают влияние деформаций поперечного сдвига и обжатия при пространственной работе конструкции. Используется для расчета конструкций из многослойных полых оболочек и пластин; тип схемы 9 – конструкции из многослойных оболочек (КЭ №81-84). Разница заключается в исходных гипотезах о совместности работы слоев модели: в типе схемы 8 реализован учет обжатия слоев, в типе схемы 9 – межслоевой сдвиг. Схема может иметь любое положение в пространстве. К шести степеням свободы признака 5 добавлены шесть их аналогов: A_X , A_Y , A_Z и C_X , C_Y , C_Z . Дополнительные степени свободы учитывают влияние

межслоевых сдвигов и кривизны. Применяется для расчета конструкций из многослойных полых оболочек и пластин [7-11].

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние с применением панелей со следующими характеристиками слоёв панелей (табл. 1):

Табл. 1

Характеристики слоёв панелей

Слой	Толщина (мм)	Плотность (т/м ³)	Модуль упругости (МПа)	Коэффициент Пуассона
Торкретирование (Микро-бетон)	50	2,3	20000	0,2
Пенополистирол	200	0,013	10	0,25
Торкретирование (Микро-бетон)	50	2,3	20000	0,2

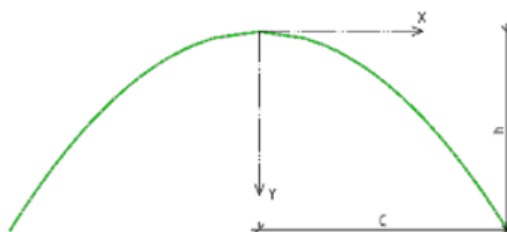


Рис. 1. - Образующая парабола

$$y = ax^2; a = \frac{h}{c^2} = 0,107$$

Результаты расчёта НДС (тип схемы-8, КЭ-71)

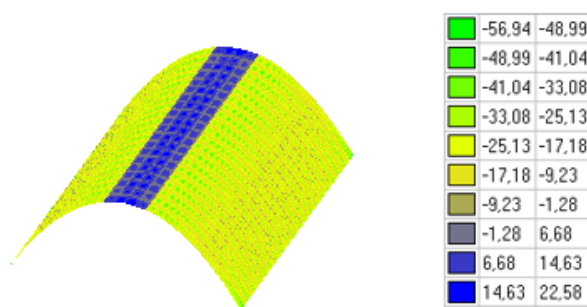


Рис. 2. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², снизу первого слоя

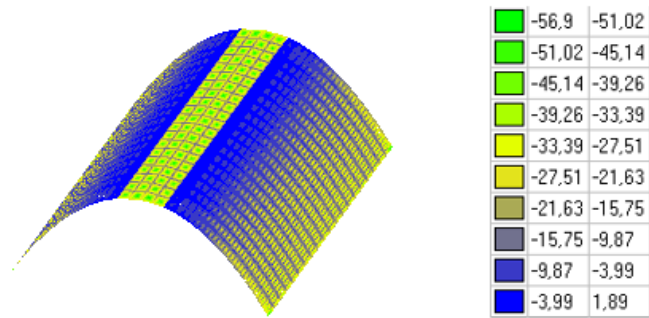


Рис. 3. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², сверху первого слоя

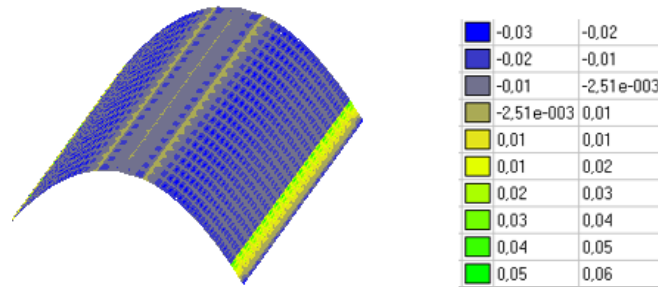


Рис. 4. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², снизу второго слоя

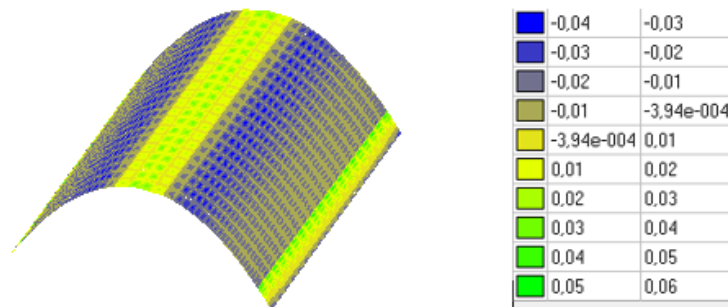


Рис. 5. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², сверху второго слоя

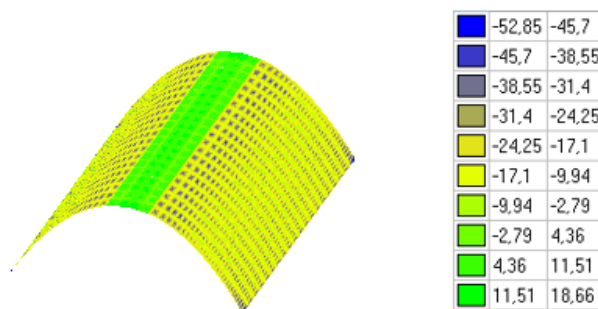


Рис. 6. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², снизу третьего слоя

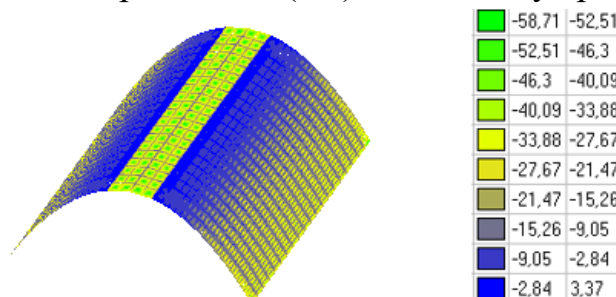


Рис. 7. - Напряжения $\sigma(N_u)$, т/м², сверху третьего слоя

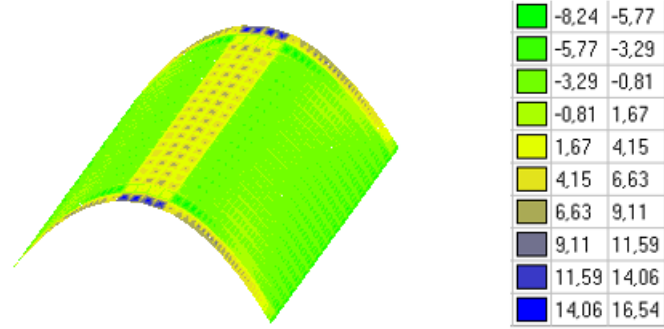


Рис. 8. - Напряжения $\sigma(N_v)$, т/м², снизу первого слоя

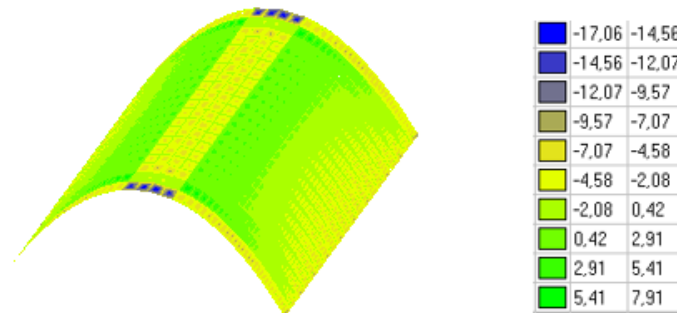


Рис. 9. - Напряжения $\sigma(N_v)$, т/м², сверху первого слоя

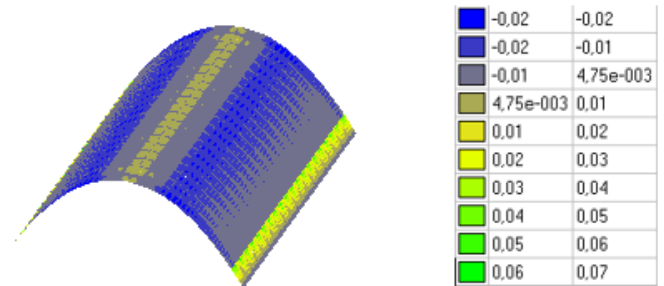


Рис. 10. - Напряжения $\sigma(N_v)$, т/м², снизу второго слоя

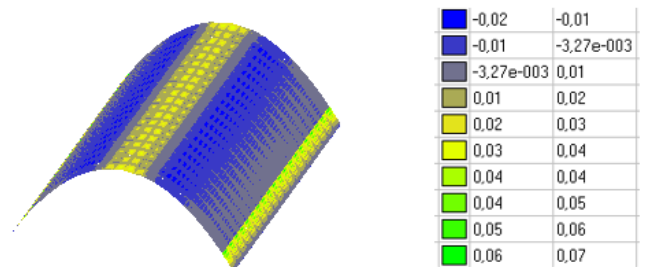


Рис. 11. - Напряжения $\sigma(N_v)$, т/м², сверху второго слоя

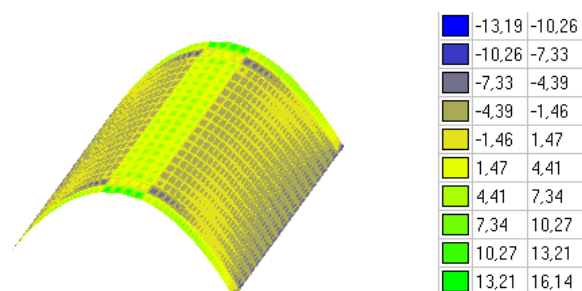


Рис. 12. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², снизу третьего слоя

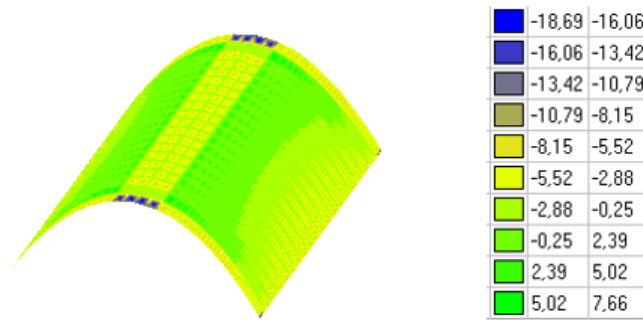


Рис. 13. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², сверху третьего слоя

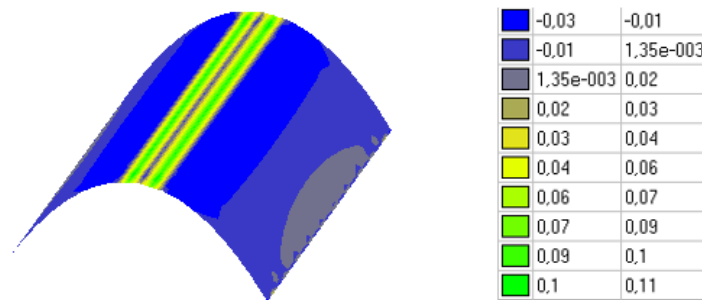


Рис. 14. - Изгибающий момент Mu , т·м/м

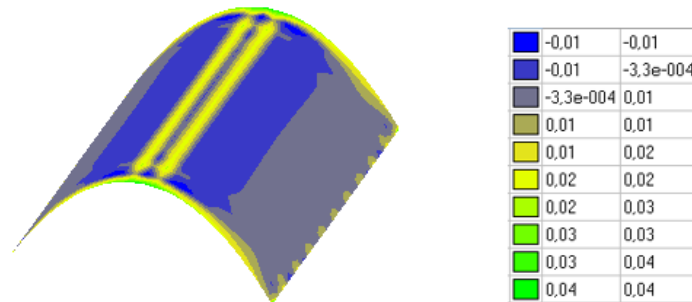


Рис. 15. - Изгибающий момент Mv , т·м/м

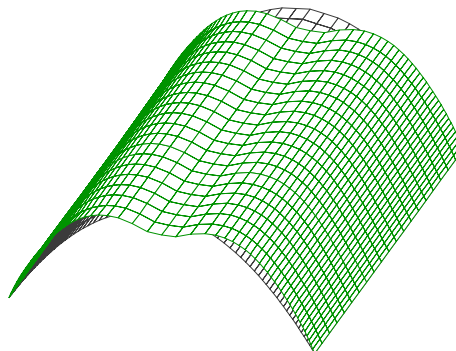


Рис. 16. - Общая деформированная схема

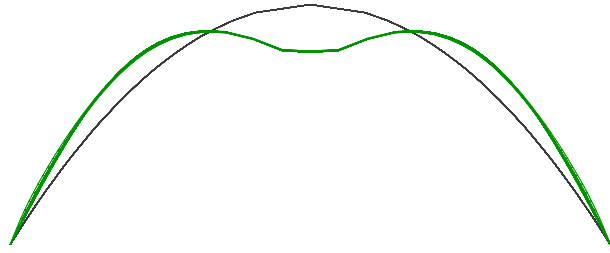


Рис. 17. - Деформации в поперечном направлении

Результаты расчёта НДС (тип схемы-9, КЭ-81)

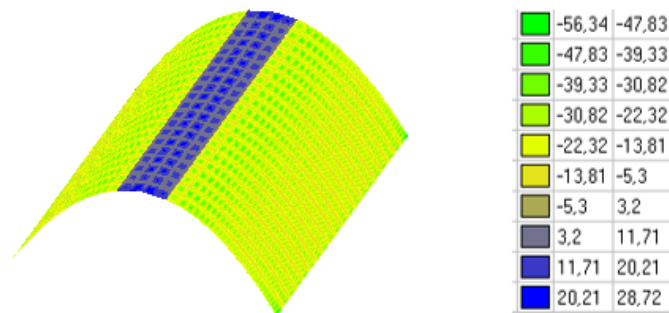


Рис. 18. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², снизу первого слоя

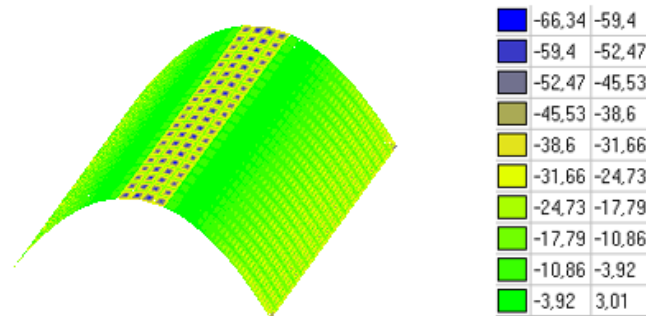


Рис. 19. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², сверху первого слоя

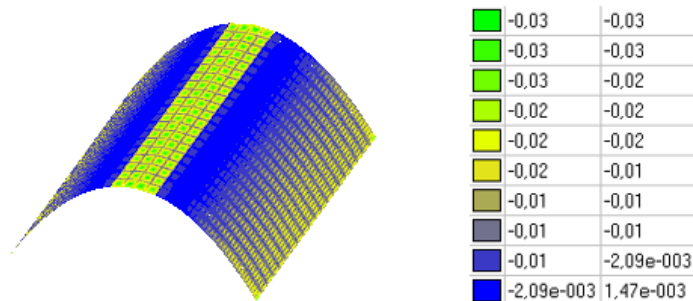


Рис. 20. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², снизу второго слоя

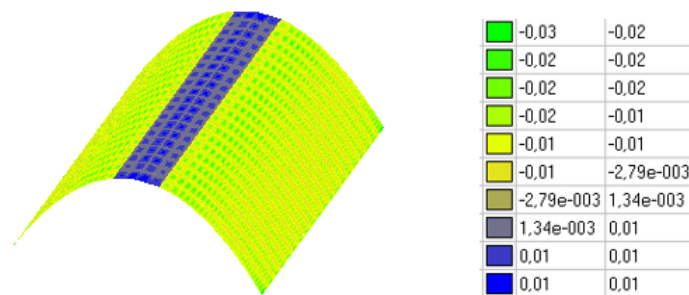


Рис. 21. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², сверху второго слоя

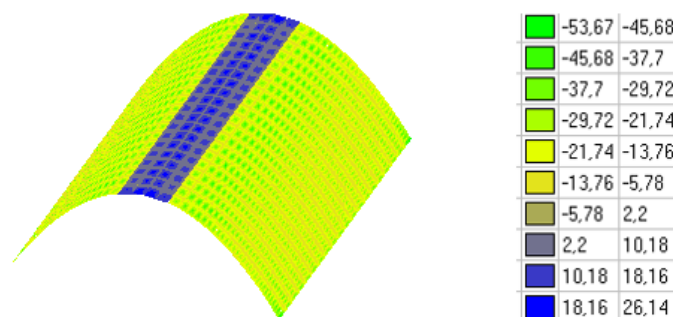


Рис. 22. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², снизу третьего слоя

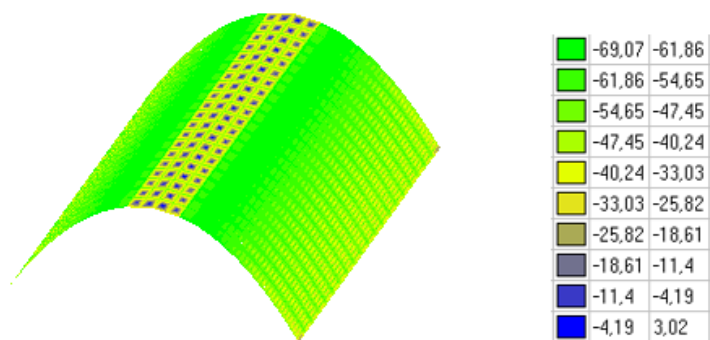


Рис. 23. - Напряжения $\sigma(Nu)$, т/м², сверху третьего слоя

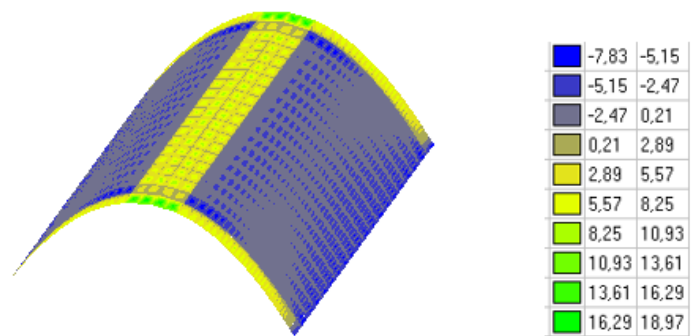


Рис. 24. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², снизу первого слоя

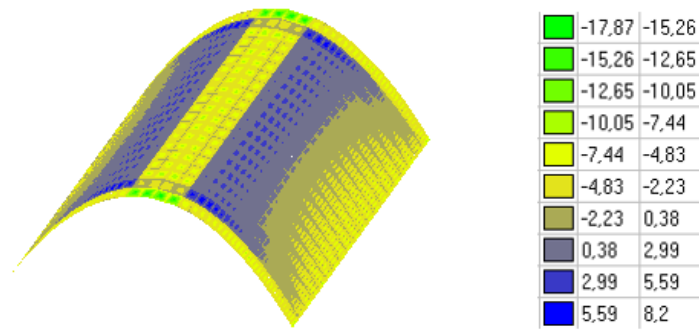


Рис. 25. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², сверху первого слоя

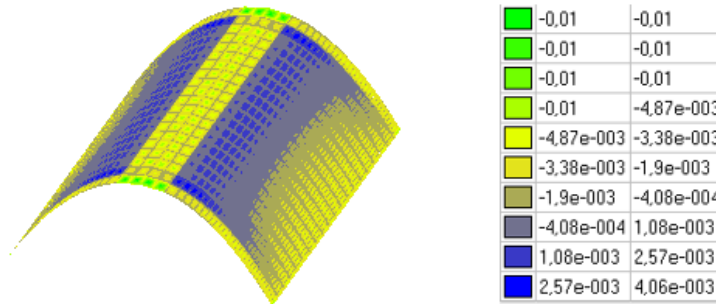


Рис. 26. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², снизу второго слоя

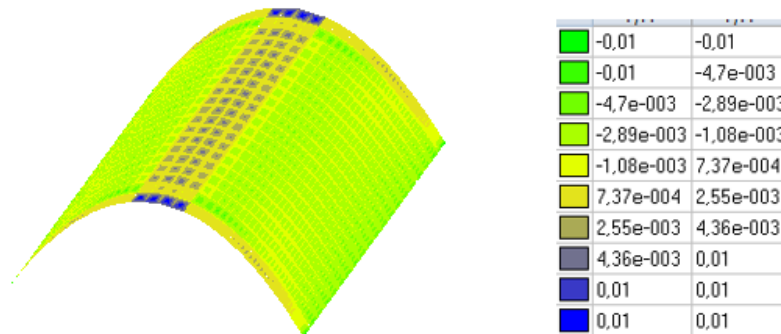


Рис. 27. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², сверху второго слоя

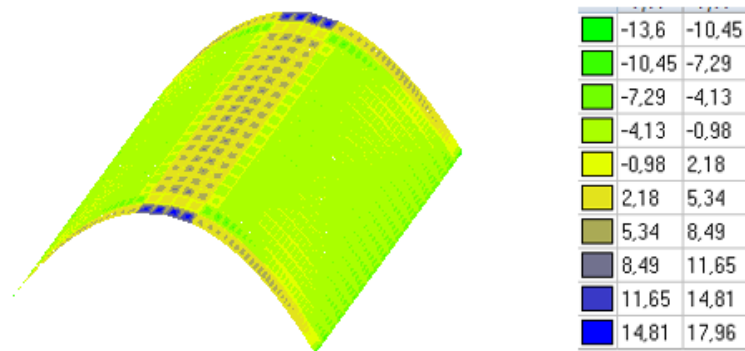


Рис. 28. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², снизу третьего слоя

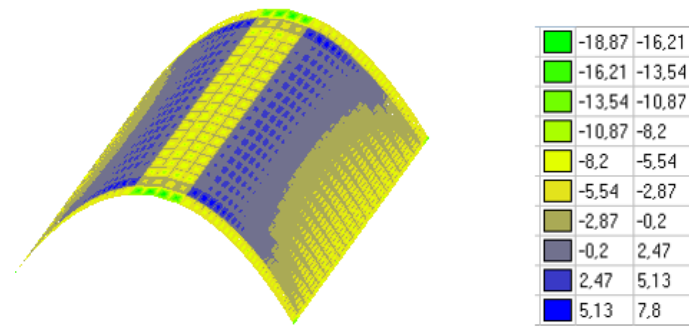


Рис. 29. - Напряжения $\sigma(Nv)$, т/м², сверху третьего слоя

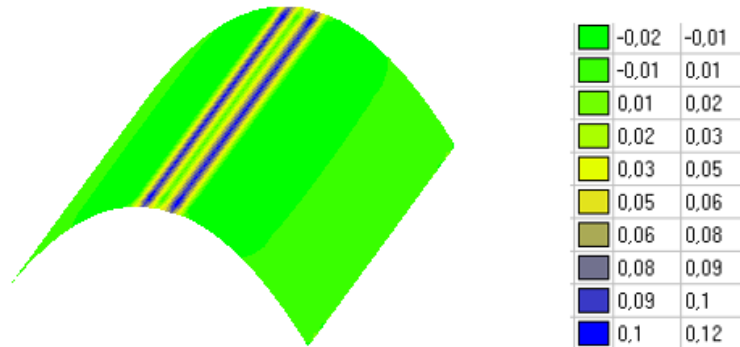


Рис. 30. - Изгибающий момент M_u , т·м/м

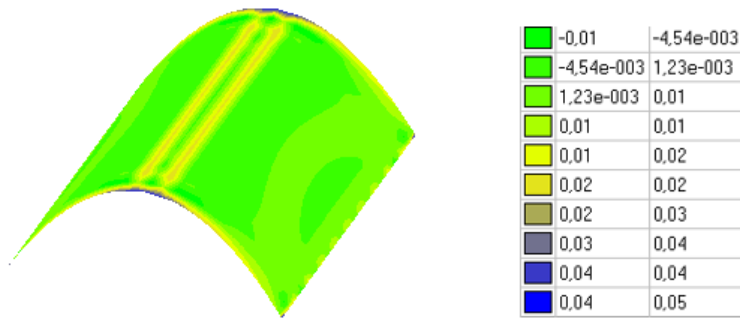


Рис. 31. - Изгибающий момент M_v , т·м/м

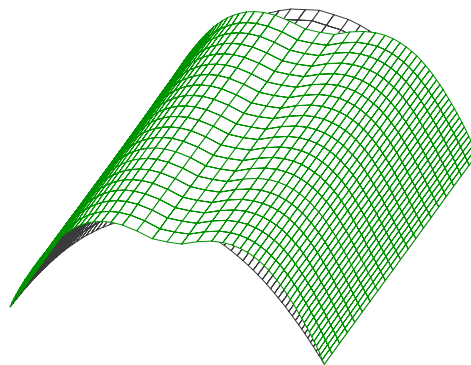


Рис. 32. - Общая деформированная схема

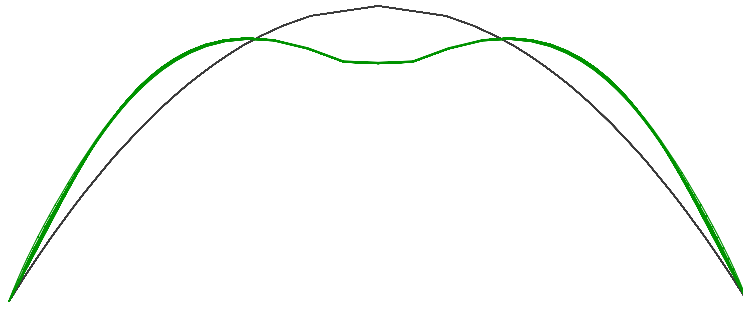


Рис. 33. - Деформации в поперечном направлении

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить ключевые различия в напряженно-деформированном состоянии многослойной параболической цилиндрической оболочки при использовании различных типов схем (8 и 9) в SCAD. Наибольшие напряжения были зафиксированы в варианте с модульными панелями (тип схемы 9), что подчеркивает важность учета межслоевого сдвига при моделировании подобных конструкций. Полученные данные демонстрируют, что выбор гипотезы работы слоев существенно влияет на распределение напряжений и деформаций. Результаты исследования могут быть полезны для инженеров и проектировщиков, занимающихся расчетом и оптимизацией оболочечных конструкций, а также для дальнейшего развития численных методов анализа в строительной механике.

Использованные источники:

1. Кадомцева Е.Э., Чепурненко А.С., Симакова А.А., Фарниева М.В., Забейворота В.А. Напряженно-деформированное состояние яйцеобразной оболочки под действием собственного веса и внутреннего давления // Инженерный вестник Дона. 2024. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4667.

2. Кривошапко С.Н. Коноидальные оболочки // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1998. № 6. С. 22-24.
3. Алёшина, О.О. Уравнения коноида с ортогональной системой координат в параметрическом виде / О.О. Алёшина, М.Х.А. Нашер, В. Дияб, М.М.А. Уваис, Чжан Жуй, Я. Хасан // Инженерный вестник Дона. – 2024 – № 7 – С. 432-443.
4. Иванов В.Н., Алёшина О.О., Ларионов Е.А. Определение оптимальных цилиндрических оболочек в форме поверхностей второго порядка // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 1. С. 37–47. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-1-37-47>.
5. Vekariya M.S., Makwana E.A.H. A Review on Thin-shell Structures: Advances and Trends. International Journal of Research Publication and Reviews. 2021;2(12):1593–1608. ISSN 2582-7421.
6. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 2015, 752.
7. Меркулов, С. И. О вариации подходов к расчету многослойных элементов в SCAD / С. И. Меркулов, С. М. Есипов // Наукоемкие технологии и инновации: Сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 29 апреля 2019 года. Том Часть 2. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2019. – С. 70-74. – EDN ICERHN.
8. Официальная документация SCAD Office: <https://scadsoft.com/help/SCAD/ru/SCAD1049/archives-general.htm> .
9. Справочные материалы по многослойным элементам: https://scadsoft.com/help/SCAD/FEMLib/ru/FEMLib1049_rtf/multilayer_elements_in_FELib.htm.
10. Руководство пользователя SCAD: <https://scadsoft.com/download/SCAD729.pdf>.

https://scadsoft.com/help/SCAD/FEMLib/ru/FEMLib1049_rtf/structure.htm .

References

1. Kadomtseva E.E., Chepurnenko A.S., Simakova A.A., Farnieva M.V., Zabeivorota V.A. Inzhenernyy vestnik Dona. 2024. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4667.
2. Krivoshapko S.N. Konoidal'nye obolochki. Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve. 1998. № 6. pp. 22-24.
3. Aleshina O.O., Nasher M.H.A., Diab W., Uwais M.M.A., Zhang Rui, Hasan Y. Inzhenernyy vestnik Dona. 2024. № 7 – P. 432-443.
4. Ivanov V.N., Aleshina O.O., Larionov E.A. Determination of optimal cylindrical shells in the form of secondorder surfaces. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2025;21(1):37–47. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-1-37-47>.
5. Vekariya M.S., Makwana E.A.H. A Review on Thin-shell Structures: Advances and Trends. International Journal of Research Publication and Reviews. 2021;2(12):1593–1608. ISSN 2582-7421.
6. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland, 2015, 752.
7. Merkulov, S. I., Esipov S. M. // Naukoemkie tehnologii i innovacii: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 65-letiyu BGTU im. V.G. Shuhova, Belgorod, 29 aprelya 2019 goda. Tom Chast' 2. – Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2019. – S. 70-74. – EDN ICERHN.
8. Oficial'naya dokumentaciya SCAD Office: <https://scadsoft.com/help/SCAD/ru/SCAD1049/archives-general.htm>.
9. Spravochnye materialy po mnogoslujnym elementam: https://scadsoft.com/help/SCAD/FEMLib/ru/FEMLib1049_rtf/multilayer_elements_in_FELib.htm.

10. Rukovodstvo

pol'zovatelya

SCAD:

<https://scadsoft.com/download/SCAD729.pdf>.

Sostav biblioteki konechnyh elementov:

https://scadsoft.com/help/SCAD/FEMLib/ru/FEMLib1049_rtf/structure.htm.