

## Моделирование поведения цилиндрических оболочечных конструкций, ослабленных отверстиями

*Д.С. Петров*

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург*

**Аннотация:** Моделирование поведения цилиндрических оболочечных конструкций, ослабленных отверстиями при приложении нагрузки, равномерно распределенной по поверхности, с учетом геометрической нелинейности в конечно-элементном программном комплексе ANSYS Mechanical APDL 2022R. Созданы модели цилиндрических оболочечных конструкций, с различными вариантами расположения отверстий, и проведен анализ поведения конструкций при увеличении величины действующей внешней равномерно распределенной нагрузки. Тип материала: изотропный, сталь. Получены графики нагрузка-прогиб. Найдены значения критической нагрузки, при которой конструкция теряет устойчивость и значения внутренних напряжений, возникающих в конструкциях при воздействии критической нагрузки. Кроме того, найдены значения перемещения узлов: центрального и в четверти при воздействии критической нагрузки.

**Ключевые слова:** Оболочечные конструкции, напряженно-деформированное состояние, потеря устойчивости, метод конечных элементов, прогиб, закритическое поведение, геометрическая нелинейность, пошаговое приложение нагрузки, график зависимости «нагрузка – прогиб», изотропный материал.

### Введение

Оболочечные конструкции применяются в гражданском, промышленном и военном строительстве. Основное преимущество оболочечных конструкций – возможность перекрытия больших пролетов и площадей, позволяющее свободно использовать подконструкционное пространство.

Оболочечные конструкции могут быть выполнены в сплошном виде, а также с отверстиями, распределенными по площади оболочки исходя из рациональных технических и технологических требований. В результате воздействия нагрузки, действующей на поверхность оболочечной конструкции, эта поверхность деформируется, изменяется расчетная схема, происходит перераспределение усилий и напряжений. При достижении критической нагрузки, оболочечная конструкция может потерять устойчивость, перемещение точек поверхности переходит границу

---

допустимых деформаций и скачкообразно увеличивается. В результате этих процессов, концентрация напряжений в элементах может превысить предел прочности материала и разрушить элемент, что может привести к разрушению конструкции. Соответственно, возникает необходимость исследования оболочечных конструкций на устойчивость.

Потеря устойчивости исходной формы равновесия под воздействием внешних сил является основной причиной разрушения оболочечных конструкций, изготовленных из современных конструкционных материалов [1-6].

### **Материалы и методы**

Выполняется моделирование поведения цилиндрических оболочечных конструкций, ослабленных отверстиями, при приложении нагрузки, равномерно распределенной по поверхности, с учетом геометрической нелинейности.

В качестве метода исследования в работе принят метод вычислительного эксперимента с помощью функциональных возможностей конечно-элементного программного комплекса ANSYS Mechanical APDL 2022R: построение моделей цилиндрических оболочечных конструкций с различными вариантами расположения отверстий из изотропного материала – стали. Расчет на устойчивость и прочность цилиндрических оболочечных конструкций с учетом геометрической нелинейности выполняется методом пошагового увеличения значения прикладываемой нагрузки, а также методом длины дуги – для анализа закритического поведения оболочечной конструкции.

Для моделирования и расчета тонкостенных оболочечных конструкций в ANSYS используются элементы категории SHELL, учитывающие такие внутренние силовые факторы как мембранное растяжение-сжатие и изгиб [7-10].

---

Форма конструкции задается геометрически, по точкам, с помощью встроенных инструментов программного комплекса. Сформированная геометрическая модель оболочечной конструкции разбивается на сетку конечных элементов, в данном случае был выбран тип элемента Shell 181 (элемент оболочки с конечными деформациями; имеет четыре узла, в каждом из которых определены шесть степеней свободы; позволяет учитывать полный набор нелинейных эффектов, включая большие деформации) [11, 12].

### Результаты исследования

#### Исследуемая модель цилиндрической оболочки

В данной работе рассматриваются выбраны два варианта моделей цилиндрических оболочечных конструкций, квадратные в плане, отличающиеся друг от друга размещением отверстий. Общие основные геометрические параметры оболочек приведены в таблице 1, схематическое отображение оболочечной конструкции представлено на рис.1.

Таблица 1

Общие основные геометрические параметры оболочечных конструкций

№	$a$ , м	$R_2$ , м	$h$ , м	$b$ , рад (°)	Закрепление	Нагрузка
1	16.00	0.08		1 (57.3)	Шарнирное по всему контуру	Распределенная

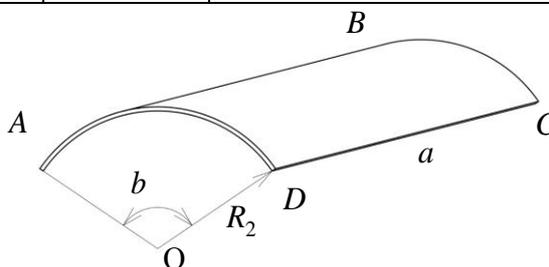


Рис. 1. – Схематическое отображение оболочечной конструкции  
 Рассматриваемые варианты расположения отверстий:

- Первый вариант: Одно отверстие 2x8 по центру, на расстоянии 6 м от края конструктивного элемента (Рис.2);

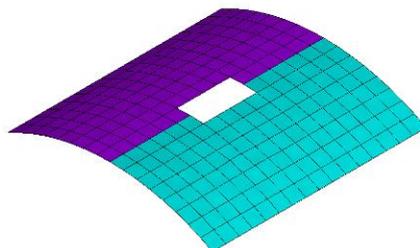


Рис. 2. – Первый вариант оболочечной конструкции, с одним центральным отверстием

- Второй вариант: Четыре отверстия 2x2 м в четвертях оболочечной конструкции, отступ от края конструкции – 2 м (Рис. 3.1.3);

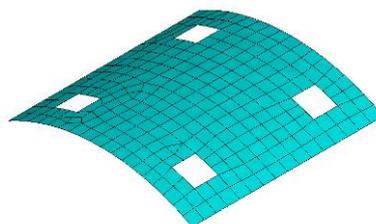


Рис. 3. – Второй вариант оболочечной конструкции, с четырьмя отверстиями в четвертях

В качестве материала оболочки выбрана сталь – универсальный изотропный материал, подробные характеристика материала представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Параметры материала оболочечных конструкций

Характеристика	Изотропный
	Сталь
$E_1$ , МПа	$2.1 \cdot 10^5$
$E_2$ , МПа	$2.1 \cdot 10^5$
$\mu_{12}$	0.3
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7800

Моделирование выполняется встроенными инструментами программного комплекса. При расчете оболочечных конструкций с учетом

геометрической нелинейности нагрузка прикладывается пошагово. Программа рассчитывает напряженно-деформированное состояние оболочечной конструкции на каждом этапе приложения нагрузки и учитывает текущее состояние конструкции для последующего расчета, таким образом удается учесть изменение расчетной схемы конструкции в процессе проведения расчета и получить данные о потере устойчивости оболочечной конструкции в процессе нагружения. Используем продвинутый нелинейный анализ (Advanced NL) добавляем функцию активации метода длины дуги (Activate arc-length method).

Результаты проведения расчетов представлены на рис. 4...11.

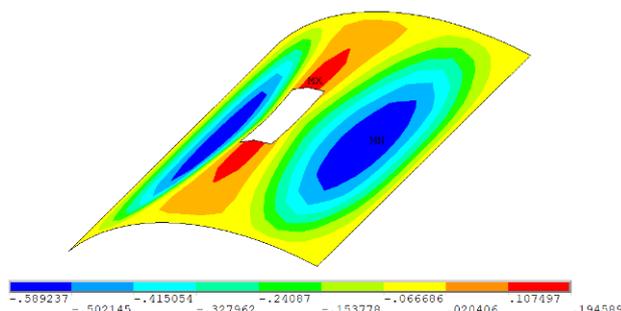


Рис. 4. – Поле деформаций по вертикали элементов модели 1 варианта, м

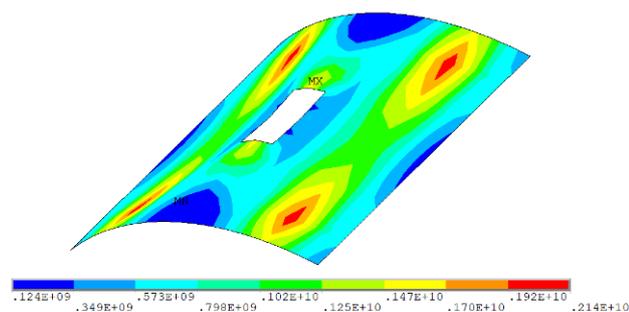


Рис. 5. – Поле напряжений в элементах модели 1 варианта, Па

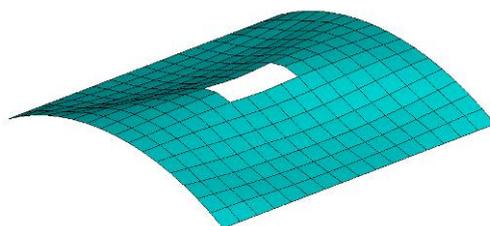


Рис. 6. – Схема деформированной модели 1 варианта

Характерным узлом для 1 варианта оболочечной конструкции является узел в четверти оболочечной конструкции: номер узла 337. График зависимости нагрузки от перемещения представлен на рис. 7. Критическая равномерно распределенная нагрузка для данной оболочечной конструкции, при которой конструкция теряет устойчивость, составляет  $P_{кр12}=0,585$  МПа.

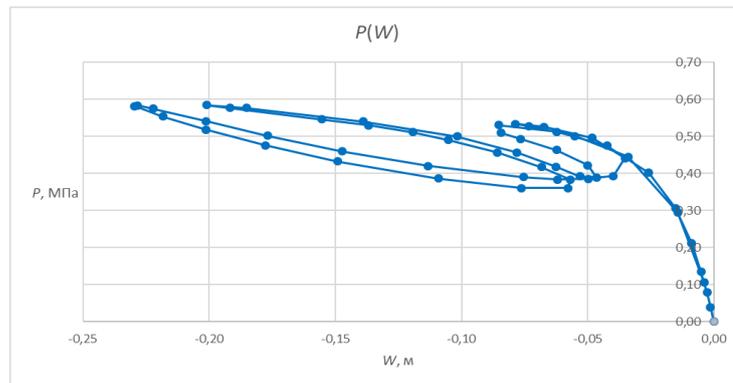


Рис. 7. – График Нагрузка-Перемещение для узла четверти 1 варианта  
Проводим расчет второго варианта оболочечной конструкции.

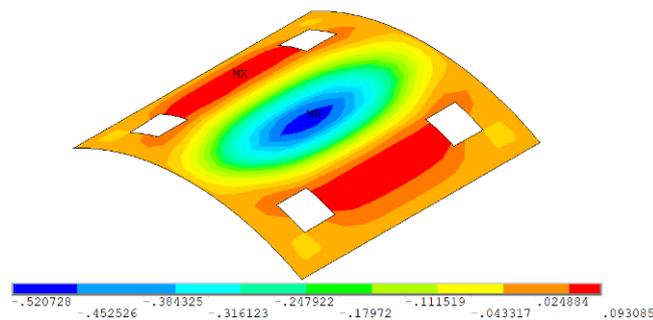


Рис. 8. – Поле деформаций по вертикали элементов модели 2 варианта,

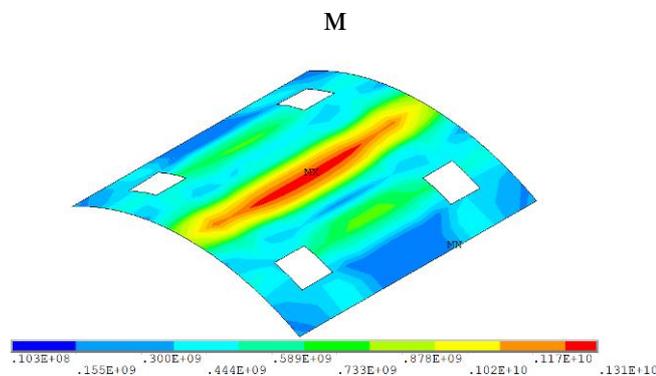


Рис. 9. – Поле напряжений в элементах модели 2 варианта, Па

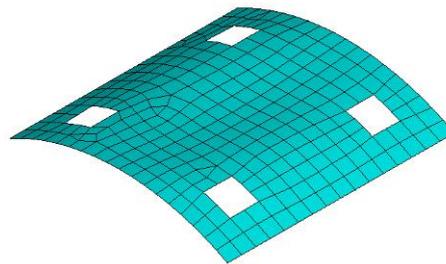


Рис. 10. – Схема деформированной модели 2 варианта

Характерным узлом для второго варианта оболочечной конструкции является узел в центре оболочечной конструкции: номер узла 111. График зависимости нагрузки от перемещения представлен на рис. 11. Критическая равномерно распределенная нагрузка, при которой конструкция теряет устойчивость, составляет  $P_{кр22}=0,575$  МПа.

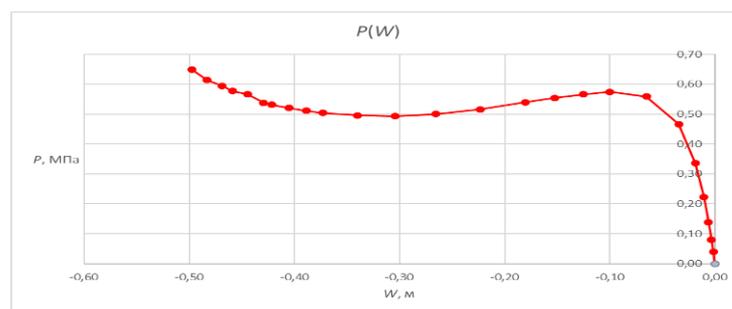


Рис. 11. – График Нагрузка-Перемещение для центрального узла 2 варианта

По итогам выполнения работы получены следующие результаты: продемонстрированы поля деформаций – перемещений по вертикали элементов оболочечных конструкций, продемонстрированы поля напряжений в элементах оболочечных конструкций, получены значения критических равномерно распределенных нагрузок, при которых цилиндрические оболочечные конструкции с отверстиями теряют устойчивость, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения критических равномерно распределенных нагрузок

Оболочечная конструкция	Вариант 1	Вариант 2
Критическая нагрузка	$P_{кр12}=0,585$ МПа	$P_{кр22}=0,575$ МПа.

### Заключение

Результаты анализа напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций с отверстиями показывают, что цилиндрические оболочки, шарнирно закрепленные по периметру, теряют устойчивость при превышении значения критической нагрузки. Размер и расположение отверстий влияют на напряженно-деформированное состояние оболочечной конструкции и значение критической нагрузки.

В соответствии с результатами расчета оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL 2022 R2 по методу приращения нагрузки, наибольшее ослабление (наименьшая критическая сила) получает первый вариант оболочечной конструкции, с одним центральным отверстием. При расчете по методу длины дуги наименьшая критическая сила у оболочки четвертого варианта, с равномерно распределенными отверстиями по поверхности оболочки. Расхождение данных результатов связано с возможностью расчета и проведения анализа поведения оболочечной конструкции в закритической области при использовании в расчете метода длины дуги.

### Литература

1. Пикуль В.В. Современное состояние теории устойчивости оболочек // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2008. № 3. С. 4.
  2. Литвинов, В. В., Языев Б.М., Бескопыльный А.Н. Устойчивость круговой цилиндрической оболочки при равномерном внешнем давлении // Инженерный вестник Дона. – 2011. – № 4. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704).
  3. Пикуль В.В. К теории устойчивости оболочек // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2006. № 4. С. 1.
-

4. Глазунова Н.А. Инженерный расчет оболочечной конструкции: лаб. раб №10 по курсу «Численные методы расчёта в инженерных задачах», метод. указ. – Самара: Самар. Гос.Техн. ун-т, 2010. 32 с.
  5. Тимофеев, С. И. Численное решение нелинейной задачи устойчивости цилиндрических изотропных оболочек на основе динамического критерия // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/720](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/720).
  6. Lavrenčić, M., Branc B. Hybrid-Mixed Shell Finite Elements and Implicit Dynamic Schemes for Shell Post-buckling // Advanced Structured Materials. – 2019. – Vol. 110. – pp. 383-412. – DOI 10.1007/978-3-030-17747-8\_21.
  7. Карпов В.В. Математическое моделирование, алгоритмы исследования модели, вычислительный эксперимент в теории оболочек: Учебное пособие / СПбГАСУ. – СПб., 2006. – 330 с.
  8. Карпов В. В. Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения. В 2 ч. Ч.1 Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. – М.: Физматлит, 2010. – 288 с.
  9. Семенов А.А. Геометрически нелинейная математическая модель расчета прочности и устойчивости ортотропных оболочечных конструкций [Диссертация]. СПб: СПбГАСУ, 2014. 183 с
  10. Басов К.А. ANSYS справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
  11. Петров Д. С., Семенов А. А. Анализ устойчивости ортотропной цилиндрической оболочечной конструкции в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 618–627. DOI: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627 EDN: ПАIEZ
-

12. Calladine C.R. Shell buckling, without 'imperfections' // Advances in Structural Engineering. 2018. T. 21, № 16. С. 2393–2403. DOI: 10.1177/1369433217751585.

### References

1. Pikul' V.V. Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2008. № 3. P. 4.
2. Litvinov, V. V., Yazyev B. M., Beskopyl'nyj A. N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2011. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/704).
3. Pikul' V.V. K teorii ustojchivosti obolochek [For the theory of shell stability] Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk. 2006. № 4. P. 1.
4. Glazunova N.A. Inzhenernyj raschet obolochечноj konstrukcii [Engineering calculation of the shell structure]: lab. works №10 course «CHislennye metody raschyota v inzhenernyh zadachah» [Numerical calculation methods in engineering problems], Samara: Samar. Gos.Tekhn. un-ty, 2010. 32 p.
5. Timofeev, S. I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/720](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2012/720)
6. Lavrenčič, M., Branc B. Advanced Structured Materials. 2019. Vol. 110. pp. 383-412. DOI 10.1007/978-3-030-17747-8\_21.
7. Karpov V.V. Matematicheskoe modelirovanie, algoritmy issledovaniya modeli, vychislitel'nyj eksperiment v teorii obolochek: Uchebnoe posobie [Mathematical modeling, model research algorithms, computational experiment in shell theory:] SPbGASU. SPb., 2006. 330 p.
8. Karpov V. V. Prochnost' i ustojchivost' podkreplennyh obolochek vrashcheniya [Strength and stability of reinforced shells of rotation]. V 2 ch. P.1 Modeli i algoritmy issledovaniya prochnosti i ustojchivosti podkreplennyh



obolochek vrashcheniya [Models and algorithms for studying the strength and stability of reinforced shells of rotation]. М.: Fizmatlit, 2010. 288 p.

9. Semenov A.A. Geometricheski nelinejnaya matematicheskaya model' rascheta prochnosti i ustojchivosti ortotropnyh obolochechnyh konstrukcij [Geometrically nonlinear mathematical model for calculating the strength and stability of orthotropic shell structures]. SPb: SPbGASU, 2014. 183 p.

10. Basov K.A. ANSYS spravochnik pol'zovatelya [ANSYS user's guide]. М.: DMK Press, 2005. 640 p.

11. Petrov D. S., Semenov A. A. Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2023. Т. 23, № 3. pp. 618-627. DOI:10.17586/2226-1494-2023-23-3-618-627

12. Calladine C.R. Shell buckling, without 'imperfections' Advances in Structural Engineering. 2018. Т. 21, № 16. pp. 2393–2403. DOI: 10.1177/1369433217751585.

**Дата поступления: 29.04.2024**

**Дата публикации: 4.06.2024**