

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS OF STRUCTURAL ANALYSIS

DOI: 10.22363/1815-5235-2025-21-3-181-190

EDN: SSMRFB

Научная статья / Research article

## Пространственный расчет тройниковых соединений цилиндрических оболочек с учетом изменения расчетной модели во времени

С.Б. Косицын , В.Ю. Акулич ✉, Л.Н. Осетинский 

Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

✉ vladimir.akulich@gmail.com

Поступила в редакцию: 7 март 2025 г.

Доработана: 8 июня 2025 г.

Принята к публикации: 15 июня 2025 г.

**Аннотация.** Выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния пересекающихся цилиндрических оболочек с учетом различного вида нелинейностей (физической, контактной и конструктивной). Пересекающиеся цилиндрические оболочки рассмотрены в составе пространственной большегабаритной системы «оболочка — основание». Выявлены наиболее напряженные участки пересекающихся оболочек, которые требуют особого внимания в процессе моделирования подобных конструкций. Следует отметить, что особая сложность данных моделей состоит в их большой вычислительной размерности, так как они включают в себя как рассматриваемую конструкцию, так и окружающее их грунтовое основание, что накладывает дополнительные требования на используемые для решения данных задач программные комплексы. Использование современных методов численного анализа позволяет значительно улучшить качество моделирования и повысить точность получаемых результатов. В частности, учитывая нелинейные свойства материалов, можно более детально оценить реальное поведение оболочек в условиях различных внешних воздействий. Кроме того, выполненный анализ свидетельствует о том, что учет стадийности строительства оказывает значительное влияние на распределение напряжений в пересекающихся оболочках. Это подчеркивает необходимость учета последовательности строительных работ, что в свою очередь может способствовать повышению надежности конструкции в целом. Дальнейшие перспективы связаны с апробацией и подтверждением работоспособности разработанных методик численного анализа на реальных системах «оболочка — основание», а также использовании полученных результатов для расчета несущих конструкций реальных проектируемых и возводимых объектов подземного строительства.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, тройниковое соединение, пространственный расчет, стадийный расчет, подземные сооружения, тоннелестроение

**Косицын Сергей Борисович**, советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики, Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, д. 9; eLIBRARY SPIN-код: 9390-7610, ORCID: 0000-0002-3241-0683; e-mail: kositsyn-s@yandex.ru

**Акулич Владимир Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики, Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, д. 9; eLIBRARY SPIN-код: 8428-4636, ORCID: 0000-0002-9467-5791; e-mail: vladimir.akulich@gmail.com

**Осетинский Леонид Николаевич**, студент, техник научно-исследовательского центра «Тепло- и массообмен в строительстве», Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, д. 9; eLIBRARY SPIN-код: 8229-2270, ORCID: 0009-0003-8268-7482; e-mail: leonid.osetinskij@yandex.ru

© Косицын С.Б., Акулич В.Ю., Осетинский Л.Н., 2025

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов:** *Косицын С.Б.* — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии; итоговые выводы; *Акулич В.Ю.* — концепция исследования, развитие методологии, реализация численных моделей, написание текста, визуализация; *Осетинский Л.Н.* — развитие методологии, реализация численных моделей, написание текста. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания номер 103-00001-25-02 от 20.03.2025 г.

**Для цитирования:** *Косицын С.Б., Акулич В.Ю., Осетинский Л.Н.* Пространственный расчет тройниковых соединений цилиндрических оболочек с учетом изменения расчетной модели во времени // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2025. Т. 21. № 3. С. 181–190. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3-181-190>

## Three-Dimensional Analysis of T-connections of Cylindrical Shells Considering Stages of Construction

Sergey B. Kosytsyn<sup>id</sup>, Vladimir Yu. Akulich<sup>id</sup>✉, Leonid N. Osetinskii<sup>id</sup>

Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

✉ vladimir.akulich@gmail.com

Received: March 7, 2025

Revised: June 8, 2025

Accepted: June 15, 2025

**Abstract.** A numerical analysis of the stress-strain state of intersecting cylindrical shells has been performed taking into account various types of nonlinearities (physical, contact, and structural). Intersecting cylindrical shells are considered as part of a large-scale three-dimensional “shell — soil” system. The study identified the most stressed areas of intersecting shells that require special attention during the modeling process. It should be noted that the particular complexity of these models lies in their high computational dimensionality since they include both the structure under consideration and its surrounding soil, which imposes additional requirements on the software packages used to solve such problems. Using modern methods of numerical analysis can significantly improve the quality of modeling and increase the accuracy of the results obtained. In particular, by considering the nonlinear properties of materials, it is possible to more accurately assess the actual behavior of shells under different external influences. In addition, the analysis shows that accounting for construction stages has a significant impact on the distribution of stresses in the intersecting shells. This underscores the need to consider the sequence of construction works, which in turn can contribute to increasing the overall reliability of the structure. Future prospects involve testing and validating the developed numerical analysis techniques on real “shell — soil” systems. The application of the obtained results to the design of load-bearing structures in real underground construction projects is also envisaged.

**Keywords:** finite element method, T-connection, three-dimensional analysis, construction stages, underground structures, tunnel construction

**Conflicts of interest.** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Authors' contribution:** *Kosytsyn S.B.* — supervision, conceptualization, methodology, conclusions; *Akulich V.Yu.* — conceptualization, methodology, implementation of numerical models, text writing, visualization; *Osetinskii L.N.* — methodology, implementation of numerical models, text writing. All authors have made an equivalent contribution to the publication

**Funding.** The work was performed within the framework of the state assignment number 103-00001-25-02 dated 03/20/2025

**For citation:** Kosytsyn S.B., Akulich V.Yu., Osetinskii L.N. Three-dimensional analysis of T-connections of cylindrical shells considering stages of construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2025;21(3):181–190. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3-181-190>

*Sergey B. Kosytsyn*, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Theoretical Mechanics, Russian University of Transport, 15, Obraztsova St, GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9390-7610, ORCID: 0000-0002-3241-0683; e-mail: kosytsyn-s@yandex.ru

*Vladimir Y. Akulich*, Candidate of Technical Sciences, Associate professor of Department of Theoretical Mechanics, Russian University of Transport, 15, Obraztsova St, GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8428-4636, ORCID: 0000-0002-9467-5791; e-mail: vladimir.akulich@gmail.com

*Leonid N. Osetinskii*, student, technician at the “Heat and Mass Transfer in Construction” Scientific Research Center, Russian University of Transport, 15, Obraztsova St, GSP-4, Moscow, 127994, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-код: 8229-2270, ORCID: 0009-0003-8268-7482; e-mail: leonid.osetinskij@yandex.ru

## 1. Введение

Проектирование и возведение уникальных зданий и сооружений в современной строительной практике требует комплексного подхода, включающего точные расчеты и всесторонние исследования поведения несущих конструкций под воздействием различных факторов. Это обусловлено как возрастающей сложностью архитектурных и инженерных решений, так и необходимостью обеспечения высокой надежности, безопасности и долговечности объектов. Важную роль в процессе проектирования играют численные методы, позволяющие моделировать поведение конструкций при различных типах нагрузок: статических, динамических, температурных, сейсмических и др. Важным аспектом численного моделирования является учет стадийности строительства, который позволяет более точно воспроизвести реальный процесс возведения конструкции.

Одними из наиболее значимых и ответственных объектов строительства являются уникальные подземные сооружения, такие как станции метрополитена, подземные переходы и транспортные узлы, глубокие тоннели, подземные депо и галереи, а также инженерные сооружения для обеспечения жизнедеятельности метро, включая системы вентиляции, водоотведения и энергоснабжения [1–3].

В процессе строительства подземных сооружений и метрополитенов, помимо основных объектов, таких как перегонные тоннели и станции, важную роль играют вспомогательные сооружения, например тоннельные сбойки. Эти элементы обеспечивают функциональность основных сооружений, но при этом требуют особого внимания при проектировании и расчетах, так как создаваемые ими пересечения создают сложное напряженно-деформированное состояние, требующее детального анализа.

Таким образом, необходимо развивать методики численного анализа подобных систем «оболочка — основание», которые могут быть успешно применены для повышения точности расчетов и обеспечения надежности и безопасности строительных конструкций.

Универсальный программный комплекс ANSYS Mechanical [4–8], использованный в работе, предоставляет широкие возможности для моделирования статического и динамического напряженно-деформированного состояния сложных пространственных конструкций, включая здания, сооружения и комбинированные системы. Программный комплекс поддерживает учет различных типов нелинейностей, таких как физическая (нелинейные свойства материалов), контактная (взаимодействие между телами) и конструктивная (стадийность возведения и нагружения конструкций). Это позволяет максимально точно воспроизвести реальные условия работы конструкций и оценить их поведение под приложенной нагрузкой. Кроме того, программный комплекс поддерживает использование языка программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language), что дает возможность расширять его функциональные возможности.

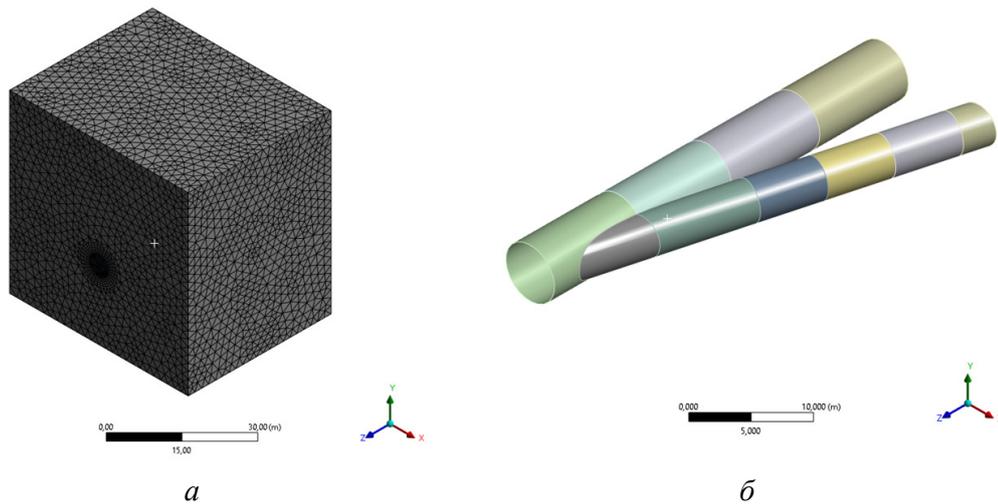
## 2. Метод расчета

Ранее авторами выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек, взаимодействующих с основанием [9]. В данной работе приведен вид тройникового соединения, где оболочки расположены относительно друг друга в плане под углом 15 градусов. Выбор угла обусловлен приближением к реальным размерам конструкций метрополитена (камеры съездов). Оболочки также разбиты на несколько частей для их поэтапного возведения.

Далее приведены основные размеры моделируемых пересекающихся оболочек и окружающего основания, а также параметры моделей материалов для них. Основная цилиндрическая оболочка диаметром  $D_1 = 5,50$  м и толщиной  $t_1 = 0,25$  м; примыкающая оболочка диаметром  $D_2 = 3,85$  м и толщиной  $t_2 = 0,20$  м. Оболочка [11–13] задана линейно-упругой моделью материала: модуль упругости  $E_{sh} = 30\,000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_{sh} = 0,2$ , плотность  $\rho_{sh} = 2300$  кг/м<sup>3</sup>. Основание задано моделью материала Мора — Кулона (O. Mohr, C.A. Coulomb) [14–15] со следующими параметрами

рами: модуль деформации  $E_{soil} = 30$  МПа, коэффициент поперечной деформации  $\mu_{soil} = 0,3$ , плотность  $\rho_{soil} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>, сцепление  $C_{soil} = 10$  кПа, угол внутреннего трения  $\varphi_{soil} = 25^\circ$ .

По аналогии с предыдущей работой [10] узел пересекающихся цилиндрических оболочек размещен на глубине 30 м от дневной поверхности. Размеры грунтового массива выбраны из условия затухания напряженно-деформированного состояния грунта и приняты по 5 диаметров большой оболочки слева и справа от нее. На рис. 1 показан общий вид расчетной модели (рис. 1, *a*) и вид пересекающихся цилиндрических оболочек под углом 15 градусов в плане (рис. 1, *б*), которые состоят из четырех частей основной цилиндрической оболочки и четырех частей примыкающей оболочки.



**Рис. 1.** Расчетная модель:

*a* — общий вид; *б* — вид тройникового соединения

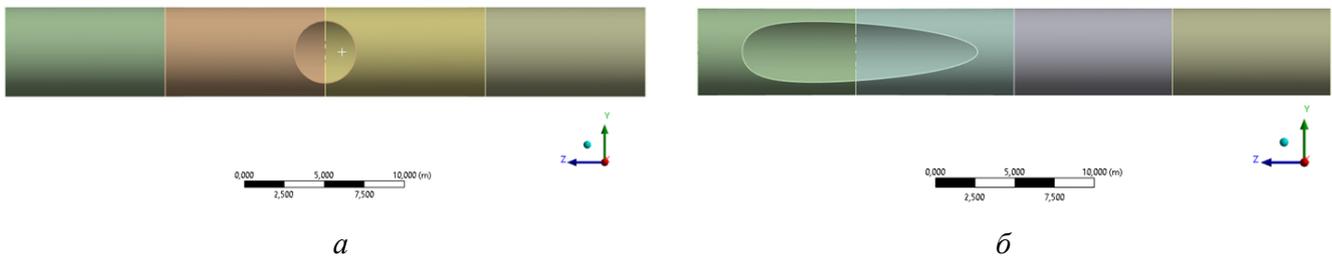
И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуlichem в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Figure 1.** Calculation model:

*a* — general view; *б* — view of the T-connection

S o u r c e: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package

На рис. 2 показано сравнение места стыка рассматриваемых тройниковых соединений. Сверху — (рис. 2, *a*) для ортогонально пересекающихся оболочек и снизу (рис. 2, *б*) для пересекающихся под углом 15 градусов в плане. Следует отметить, что чем меньше угол пересечения оболочек, тем большие размеры приобретает место их стыка, что может привести к сильному увеличению общих габаритов модели и росту необходимых вычислительных ресурсов.



**Рис. 2.** Место стыка рассматриваемых тройниковых соединений:

*a* — ортогонально пересекающихся оболочек; *б* — оболочек, пересекающихся под углом 15 градусов в плане

И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуlichem в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Figure 2.** The joint of the considered T-connections:

*a* — orthogonally intersecting shells; *б* — shells intersecting at an angle of 15 degrees in plan

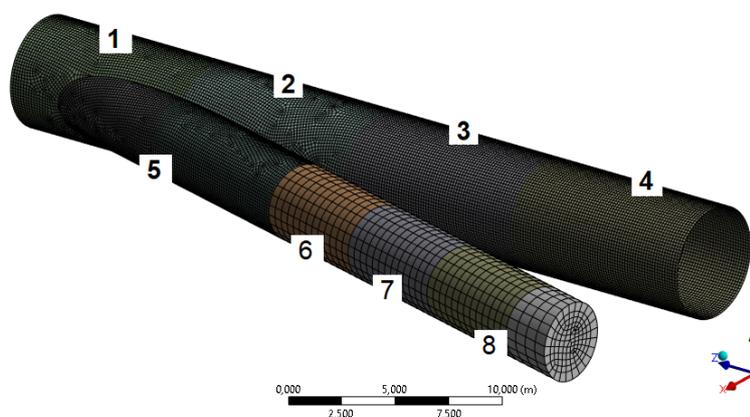
S o u r c e: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package

На нижней и боковых поверхностях грунтового массива, а также на краях тройникового соединения заданы граничные условия, обеспечивающие геометрическую неизменяемость системы. Эти условия включают фиксацию перемещений в соответствующих направлениях, что исключает возможность смещения конструкций и грунтового основания за пределы расчетной области и позволяет воспроизвести их реальную работу. Нагрузка на систему приложена только от собственного веса конструкций и грунтового массива [11–13].

Моделирование контактного взаимодействия реализовано с помощью контактных пар, расположенных на внешней поверхности тройникового соединения и границе грунтового основания. Зона контакта определяется в ходе решения задачи, поскольку ее точное положение заранее неизвестно и зависит от совокупности факторов, включая приложенные нагрузки, характеристики материалов, граничные условия и другие параметры [14–18]. В процессе расчета взаимодействующие поверхности могут как вступать в контакт, так и разъединяться, что требует учета нелинейного характера их взаимодействия.

В целях анализа влияния стадийности строительства на напряженно-деформированное состояние конструкции составлены расчетные случаи с различным количеством этапов возведения тройникового соединения: 1, 2, 4 и 8 стадий. Вначале идет активация основной оболочки, затем примыкающей оболочки со стороны основной. В каждом случае дополнительно предусмотрена нулевая стадия, которая служит для определения бытового состояния грунтового основания до начала строительных работ. Также выполнен расчет без учета стадийности строительства для сравнения результатов.

На рис. 3 показан вид одного из промежуточных этапов возведения пересекающихся цилиндрических оболочек, когда основная оболочка  $D_1 = 5,50$  м и толщиной  $t_1 = 0,25$  м уже установлена (1–4-я части), а примыкающая  $D_2 = 3,85$  м и толщиной  $t_2 = 0,20$  м установлена частично (5-я часть). На местах установки следующих частей (6–8-я части) примыкающей оболочки на данном этапе активированы только элементы основания грунта.



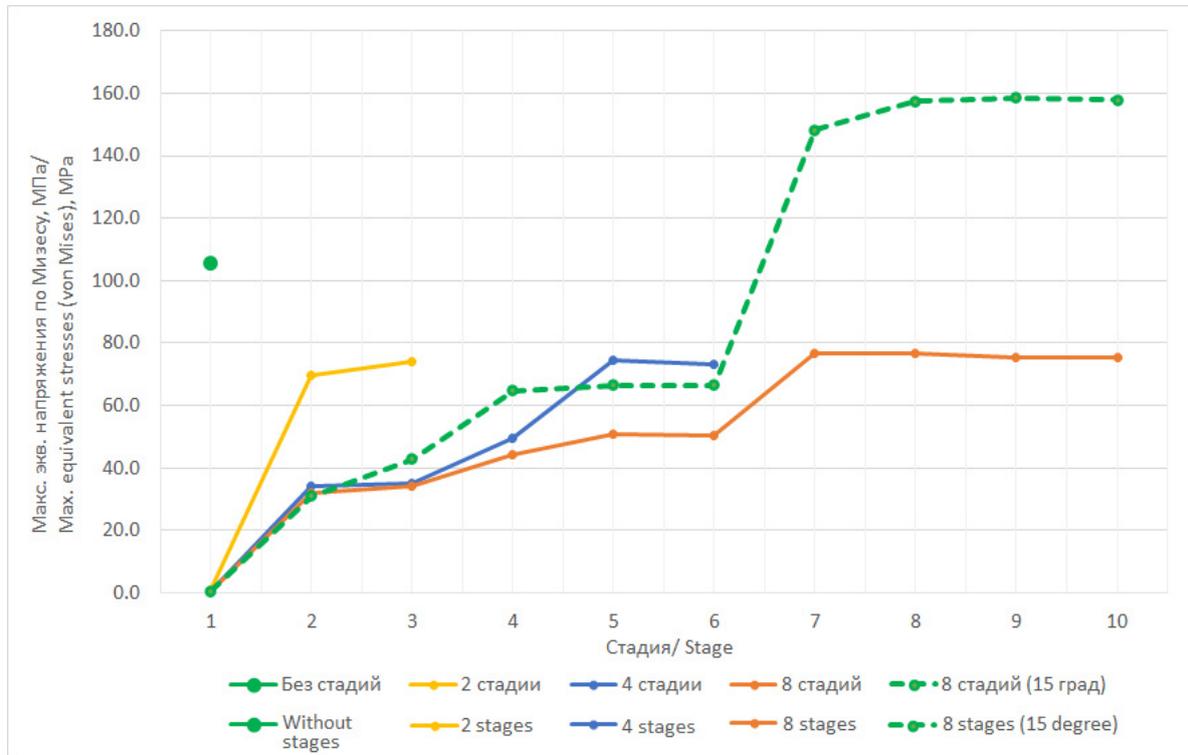
**Рис. 3.** Вид одного из промежуточных этапов возведения пересекающихся цилиндрических оболочек  
И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуличем в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Figure 3.** The view of the intermediate stage of construction of intersecting cylindrical shells  
S o u r c e: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package

### 3. Результаты и обсуждение

По результатам выполненных расчетных случаев проведен сравнительный анализ максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу [19–21] с результатами, полученными ранее для ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек. Кривые изменения напряжений в оболочке в зависимости от количества стадий в расчетном случае показаны на рис. 4. Для сравнения выбран рас-

четный случай с 8 этапами возведения оболочек, пересекающихся под углом 15 градусов в плане (зеленая штриховая линия на графике). Также показано максимальное эквивалентное напряжение по Мизесу в тройниковом соединении без учета стадий.



**Рис. 4.** Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в пересекающихся оболочках

И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуличем в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Figure 4.** Maximum equivalent stresses (von Mises) in intersecting shells

S o u r c e: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package

Напряжения по Мизесу  $\sigma_e$  определяются по формуле

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]},$$

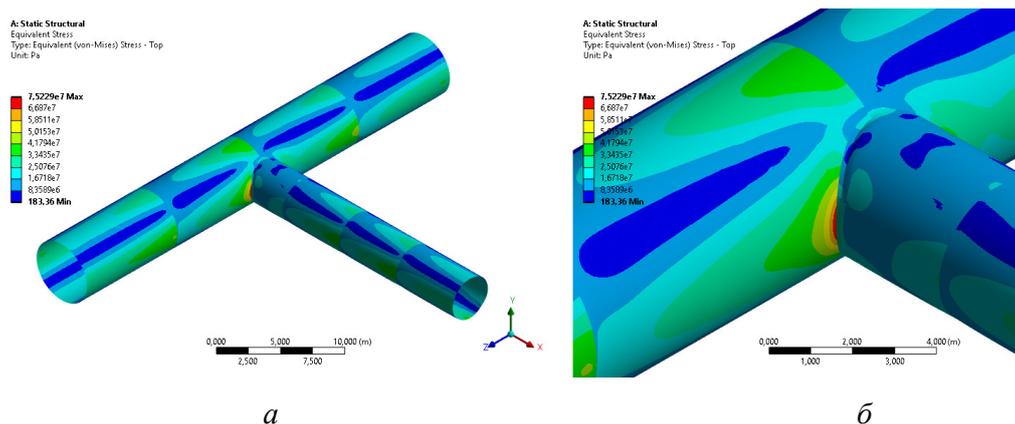
где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  — главные напряжения.

Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составляют 71,2 МПа и 158,6 МПа при 8 стадиях расчета в вариантах с ортогональным соединением и с соединением под углом 15 градусов в плане соответственно. Следует отметить, что максимальные напряжения возникают локально (на стыке) и в остальном теле оболочек напряжения значительно ниже.

Распределение максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в теле ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек в случае с 8-ю стадиями возведения показано на рис. 5. Максимальные значения напряжений возникают в месте сопряжения оболочек.

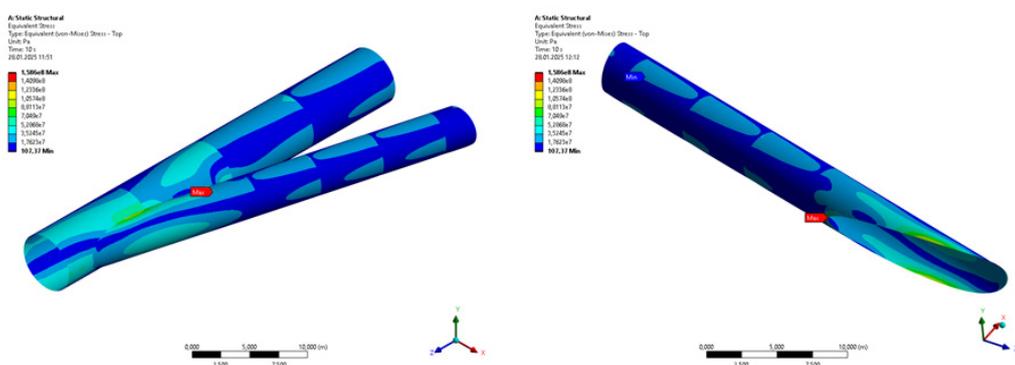
Распределение максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в теле оболочек в случае с соединением под углом 15 градусов в плане с 8-ю стадиями возведения показано на рис. 6. Максимальные значения напряжений возникают в месте сопряжения оболочек.

В таблице представлены максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в теле тройникового соединения для рассмотренных расчетных случаев.



**Рис. 5.** Распределение максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в теле ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек: *a* — место сопряжения оболочек; *б* — увеличенный вид места сопряжения оболочек  
И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуличем в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Figure 5.** Distributions of maximum equivalent stresses (von Mises) in the body of cylindrical shells: *a* — is the interface of the shells; *б* — enlarged view of the connection of shells  
S o u r c e: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package



**Рис. 6.** Распределение максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу в теле оболочек в случае с соединением под углом 15 градусов в плане. Справа показано место сопряжения оболочек  
И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуличем в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Figure 6.** Distributions of maximum equivalent stresses (von Mises) in the body of the shells in the case of a connection at an angle of 15 degrees in plan. The location of the shell connection is shown on the right  
S o u r c e: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package

**Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу в теле тройникового соединения**

№	Количество стадий возведения	Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа
Ортогонально пересекающиеся цилиндрические оболочки		
1	Без учета стадий	105,6
2	1	78,2
3	2	72,5
4	4	77,4
5	8	75,2
Цилиндрические оболочки с соединением под углом 15 градусов в плане		
6	8	158,6

И с т о ч н и к: выполнено В.Ю. Акуличем в программном комплексе ANSYS Mechanical

**Maximum equivalent stresses (von Mises) in the T-connection**

№	Number of construction stages	Maximum equivalent stresses (von Mises), MPa
Orthogonally intersecting cylindrical shells		
1	Without stages	105.6
2	1	78.2
3	2	72.5
4	4	77.4
5	8	75.2
Cylindrical shells with a connection at an angle of 15 degrees in plan		
6	8	158.6

Source: made by V.Yu. Akulich in ANSYS Mechanical software package

**4. Заключение**

1. Полученные результаты подтвердили важность учета стадийности возведения при определении напряженно-деформированного состояния тройниковых соединений, взаимодействующих с основанием.

2. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу составляют 71,2 МПа и 158,6 МПа при 8 стадиях расчета в вариантах с ортогональным соединением и с соединением под углом 15 градусов соответственно. Следует отметить, что максимальные напряжения возникают локально (на стыке) и в остальном теле оболочек напряжения значительно ниже.

3. Перспективы дальнейших исследований связаны с применением нелинейных материалов оболочки и различными вариантами контактного взаимодействия оболочки и основания.

**Список литературы**

1. Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л. Численные и аналитические методы расчета строительных конструкций. Москва : АСВ, 2009. 336 с. ISBN 978-5-93093-675-9
2. Акимов П.А., Мозгалева М.Л. Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе В-сплайнов для локального решения двумерной задачи теории упругости // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 1. С. 32–41. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.1.32-41> EDN IYPOKW
3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. Москва : АСВ, 2020. 736 с. ISBN 9785930938067
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Москва : Мир, 1984. 429 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/3236> (дата обращения: 02.03.2025).
5. Трушин С.И. Метод конечных элементов : теория и задачи. Москва : АСВ, 2008. 256 с. ISBN 978-5-93093-539-4
6. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. Москва : ДМК Пресс, 2005. 640 с. ISBN 978-5-97060-593-6
7. Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications / ANSYS, Inc. 2009. 1226 p.
8. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. Москва : Стройиздат, 1982. 446 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/407> (дата обращения: 02.03.2025).
9. Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полушин В.М., Башмаков И.Б., Паскачева Д.А. Математическое моделирование работы плитных элементов при совместной работе с грунтовым основанием в условиях плоской деформации // Жилищное строительство. 2024. № 11. С. 37–46. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-11-37-46> EDN BYRBSC
10. Косицын С.Б., Акулич В.Ю. Численный анализ НДС ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек, взаимодействующих с основанием, с учетом изменения расчетной модели во времени // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 4. С. 303–310. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-303-310> EDN TVXXYV
11. Клочков Ю.В., Джабраилов А.Ш., Ицанов Т.Р., Марченко С.С., Андреев А.С., Клочков М.Ю. Конечно-элементный расчет эллиптического цилиндра в геометрически нелинейной постановке при использовании векторной формы интерполяционной процедуры // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2022. № 1. С. 58–71. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.1.06> EDN MYVJBF

12. Джабраилов А.Ш., Николаев А.П., Клочков Ю.В., Гуреева Н.А., Ищанов Т.Р. Нелинейное деформирование осесимметрично нагруженной оболочки вращения на основе МКЭ при различных вариантах определяющих уравнений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2022. Т. 22. № 1. С. 48–61. <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-48-61> EDN JHCOIF
13. Трещев А.А. Тонкостенные цилиндрические оболочки как объект экспериментального определения механических свойств конструкционных материалов (всегда ли допустимы классические представления при испытании трубчатых образцов) // Строительная механика и конструкции. 2020. № 1 (24). С. 7–18 EDN СТАВJZ.
14. Лалин В.В., Ле Т.К.Ч. Расчет строительных конструкций на несколько динамических воздействий со статическим учетом высших форм колебаний // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 3. С. 171–178. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-171-178> EDN VSEGWP
15. Mozgaleva M. L., Akimov P.A. Localization of solution of the problem for Poisson's equation with the use of B-spline discrete-continual finite element method // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 17. No. 3. P. 157–172. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-3-157-172> EDN MFCJOI
16. Янковский А.П. Уточненная модель вязкоупругопластического деформирования армированных цилиндрических оболочек // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 1. С. 138–149. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.11> EDN GEUKCU
17. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. Москва : Мир. 1975. 542 с. URL: <https://djvu.online/file/DtUw9BqXrtZCc> (дата обращения: 02.03.2025).
18. Зверьяев Е.М., Пыхтин А.В., Хоа В.Д. Пространственная задача для прямоугольной упругой пластины // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 4 (297). С. 2–11. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.4.2.11> EDN SUBZUM
19. Бакулин В.Н. Модель для анализа напряженно-деформированного состояния трехслойных цилиндрических оболочек с прямоугольными вырезами // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2022. № 1. С. 122–132. <https://doi.org/10.31857/S0572329922010032> EDN UFTFXV
20. Li J., Shi Z., Liu L. A scaled boundary finite element method for static and dynamic analyses of cylindrical shells // Engineering Analysis with Boundary Elements. 2019. Vol. 98. P. 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.10.024>
21. Zang Q., Liu J., Ye W., Yang F., Pang R., Lin G. High-performance bending and buckling analyses of cylindrical shells resting on elastic foundation using isogeometric scaled boundary finite element method // European Journal of Mechanics — A/Solids. 2023. Vol. 100. Article no: 105013. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105013>

## References

1. Zolotov A.B., Akimov P.A., Sidorov V.N., Mozgaleva M.L. *Numerical and analytical methods for calculating building structures*. Moscow: ASB Publ.; 2009. (In Russ.) ISBN 978-5-93093-675-9
2. Akimov P.A., Mozgaleva M.L. B-spline wavelet discrete-continual finite element method for the local solution to the two-dimensional problem of the theory of elasticity. *Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2022;17(1): 32–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.1.32-41> EDN IYPOKW
3. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Calculation models of structures and possibilities of their analysis*. Moscow: ASV Publ.; 2020. (In Russ.) ISBN 9785930938067
4. Gallager R. *The finite element method. Fundamentals*. Moscow: Mir Publ.; 1984. (In Russ.) Available from: <https://dwg.ru/dnl/3236> (accessed: 02.03.2025).
5. Trushin S.I. *Finite element method. Theory and problems*. Moscow: ACB Publ.; 2008. (In Russ.) ISBN 978-5-93093-539-4
6. Basov K.A. *ANSYS: user reference*. Moscow: DMK Press, 2005. (In Russ.) ISBN 978-5-97060-593-6
7. *Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications*. ANSYS, Inc. 2009.
8. Bate K., Wilson E. *Numerical methods of analysis and the finite element method*. Moscow: Strojizdat Publ.; 1982. (In Russ.) Available from: <https://dwg.ru/dnl/4071> (accessed: 02.03.2024).
9. Mangushev R.A., Dyakonov I.P., Polunin V.M., Bashmakov I.B., Paskacheva D.A. Mathematical modeling of the operation of plate elements when working together with a soil base in conditions of flat deformation. *Housing Construction*. 2024;(11):37–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-11-37-46> EDN BYRBSC
10. Kosytsyn S.B., Akulich V.Yu. Numerical stress analysis of orthogonally intersecting cylindrical shells interacting with soil considering stages of construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(4): 303–310. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-303-310> EDN TVXXYV
11. Klochkov Yu.V., Dzhabrailov A.Sh., Ishchanov T.R., Marchenko S.S., Andreev A.S., Klochkov M.Yu. Finite element analysis of an elliptical cylinder in geometrically nonlinear formulation using vector form of interpolation procedure. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2022;(1):58–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.1.06> EDN MYVJBF

12. Dzhabrailov A.Sh., Nikolaev A.P., Klochkov Yu.V., Gureeva N.A., Ishchanov T.R. Nonlinear deformation of axisymmetrically loaded rotation shell based on fem with different variants of definitional equations. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*. 2022;22(1):48–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2022-22-1-48-61> EDN JHCOIF
13. Treshchev A.A. Thin-walled cylindrical shells as an object of experimental determination of mechanical properties of structural materials (are classical representations always acceptable when testing tubular specimens). *Structural Mechanics and Structures*. 2020;(1):7–18. (In Russ.) EDN CTAVJZ
14. Lalin V.V., Le T.K.Ch. Calculation of building structures for several dynamic actions with static consideration of higher vibration modes. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(3):171–178. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-3-171-178> EDN VSEGWP
15. Mozgaleva M.L., Akimov P.A. Localization of solution of the problem for Poisson's equation with the use of B-spline discrete-continual finite element method. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021;17(3):157–172. (In Russ.) <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-3-157-172> EDN MFCJOI
16. Yankovsky A.P. Refined model of viscoelastoplastic deformation of reinforced cylindrical shells. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2020;(1):138–149. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.11> EDN GEUKCU
17. Zenkevich O.K. *The finite element method in engineering*. Moscow: Mir Publ.; 1975. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/DtUw9BqXrtZCc> (accessed: 02.03.2024).
18. Zveryaev E.M., Pyhtyn A.V., Hoa V.D. Spatial problem for rectangular elastic plate. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2021;(4):2–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.4.2.11> EDN SUBZUM
19. Bakulin V.N. Model for analysis of stress-strain state of three-layer cylindrical shells with rectangular cutouts. *Mechanics of Solids*. 2022;(1):122–132. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0572329922010032> EDN UFTFXV
20. Li J., Shi Z., Liu L. A scaled boundary finite element method for static and dynamic analyses of cylindrical shells. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2019;98:217–231. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.10.024>
21. Zang Q., Liu J., Ye W., Yang F., Pang R., Lin G. High-performance bending and buckling analyses of cylindrical shells resting on elastic foundation using isogeometric scaled boundary finite element method. *European Journal of Mechanics — A/Solids*. 2023;100:105013. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2023.105013>