СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ
STRUCTURAL MECHANICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND BUILDINGS

2026. 22(3). 283–292

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)

HTTP://JOURNALS.RUDN.RU/STRUCTURAL-MECHANICS



DOI: 10.22363/1815-5235-2026-22-3-283-292
EDN: LJRNOJ

Научная статья / Research article

Оценка размеров фрагмента грунтового массива при численном моделировании тройникового соединения цилиндрических оболочек

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

Российский университет транспорта, *Москва, Российская Федерация*
✉ vladimir.akulich@gmail.com

Поступила в редакцию: 22 марта 2026 г.
Доработана: 28 мая 2026 г.
Принята к публикации: 3 июня 2026 г.

Аннотация. Выполнено численное моделирование пространственной системы «оболочка – грунтовый массив», включающей тройниковое соединение цилиндрических оболочек и прилегающий грунтовый массив, с использованием контактных элементов для описания зазора между конструкцией и грунтом. Исследование проведено для фрагментов массива различной ширины с целью оценки их влияния на величину и форму мульды осадки земной поверхности. Рассмотрены восемь расчетных моделей, в которых расстояние L от краев основной и примыкающей оболочек до боковых торцов массива изменялось в диапазоне от $1D$ до $8D$ с шагом D, где D — диаметр основной оболочки. Окружающий массив моделировался трехмерными конечными элементами (SOLID186, SOLID187), цилиндрическая оболочка моделировалась оболочечными элементами (SHELL181); поведение грунта описано упругопластической моделью Мора — Кулона. Получены семейства кривых мульд осадок поверхности массива в поперечном и продольном направлениях к оси примыкающей оболочки. Установлено, что при ширине расчетного массива от $1D$ до $5D$ заметно изменяются как величины осадок, так и форма мульды оседания, а при дальнейшем увеличении размеров расчетной области ($L \geq 5D$) изменение формы и глубины мульды становится незначительным. На основе анализа напряженно-деформированного состояния системы для инженерных расчетов рекомендовано принимать ширину массива $L \geq 5D$, при этом предпочтительным является значение $L = 5D$, обеспечивающее достаточную точность прогнозирования осадки без чрезмерного увеличения числа конечных элементов. Полученные результаты позволяют поддерживать баланс между скоростью расчета и достоверностью математического моделирования, что особенно важно при многовариантном анализе.

Ключевые слова: строительная механика, метод конечных элементов, осадка поверхности, подземные сооружения

Вклад авторов: *Косицын С.Б.* — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, итоговые выводы; *Акулич В.Ю.* — концепция исследования, развитие методологии, реализация численных моделей; *Осетинский Л.Н.* — развитие методологии, написание статьи, визуализация. Авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в публикуемую статью.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания номер 103-00001-26-00 от 15.01.2026 г.

Для цитирования: *Косицын С.Б., Акулич В.Ю., Осетинский Л.Н.* Оценка размеров фрагмента грунтового массива при численном моделировании тройникового соединения цилиндрических оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2026. Т. 22. № 3. С. 283–292. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-3-283-292 EDN: LJRNOJ

Косицын Сергей Борисович, советник РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры 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; ORCID: 0009-0003-8268-7482; e-mail: leonid.osetinsckij@yandex.ru

© Косицын С.Б., Акулич В.Ю., Осетинский Л.Н., 2026

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

Estimation of Dimensions of the Soil Body Fragment in Numerical Modeling of a T-Connection of Cylindrical Shells

Sergey B. Kosytsyn, Vladimir Yu. Akulich✉, Leonid N. Osetinskii

Russian University of Transport, *Moscow*, *Russian Federation*
✉ vladimir.akulich@gmail.com

Received: March 22, 2026
Revised: May 28, 2026
Accepted: June 3, 2026

Abstract. A numerical simulation of the three-dimensional "shell — soil" system was performed, comprising a T-connection of cylindrical shells and the surrounding soil body, using contact elements to describe the gap between the structure and the soil. The study was carried out for soil fragments of various widths in order to evaluate their influence on the magnitude and shape of the surface settlement trough. Eight models were considered, in which the distance L from the edges of the main and adjoining shells to the lateral faces of the soil body varied from $1D$ to $8D$ in steps of D, where D is the diameter of the main shell. The surrounding soil body was modeled with three-dimensional finite elements (SOLID186, SOLID187), the cylindrical shell — with shell elements (SHELL181); the soil behavior was described by the elastic-plastic Mohr–Coulomb model. Families of surface settlement trough curves were obtained in the transverse and longitudinal directions relative to the axis of the adjoining shell. It was established that for the soil body width from $1D$ to $5D$ both the settlement magnitudes and the shape of the settlement trough change noticeably, whereas with a further increase of the model domain ($L \geq 5D$) the change in the shape and depth of the trough becomes insignificant. Based on the stress analysis of the system, it is recommended for engineering calculations to adopt a soil body width of $L \geq 5D$, with $L = 5D$ being preferable, providing sufficient accuracy of settlement prediction without an excessive increase in the number of finite elements. The obtained results help maintain a balance between computational speed and reliability of the mathematical modeling, which is especially important in multivariate analysis.

Keywords: structural mechanics, finite element method, surface settlement, underground structures

Authors' contribution. *Kosytsyn S.B.* — supervision, conceptualization, methodology, conclusions; *Akulich V.Yu.* — conceptualization, methodology, numerical models; *Osetinskii L.N.* — methodology, writing, visualization. The authors read and approved the final version of the article.

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

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the article being published.

Funding. The work was performed within the framework of the state assignment number 103-00001-26-00 dated 01/15/2026.

For citation: Kosytsyn SB, Akulich VYu, Osetinskii LN. Estimation of dimensions the soil body fragment in numerical modeling of a T-connection of cylindrical shells. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2026;22(3):283–292. (In Russ.) http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-3-283-292 EDN: LJRNOJ

1. Введение

Создание и строительство подземных объектов в инженерно-строительной практике предполагает использование интегрированного подхода, основанного на точных вычислениях и детальном анализе работы несущих элементов во взаимодействии с грунтовой средой. Существенное место в проектном процессе занимают расчетные методы, в особенности метод конечных элементов (МКЭ), обеспечивающие моделирование строительных конструкций при разнообразных видах нагрузок с учетом нелинейных свойств грунтового массива [1–7].

Sergey B. Kosytsyn, Advisor of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN), Doctor of Technical Sciences, Professor 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: kositsyn-s@yandex.ru
Vladimir Yu. 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; ORCID: 0009-0003-8268-7482; e-mail: leonid.osetinsckij@yandex.ru

Среди наиболее ответственных объектов подземного строительства — станции метрополитена, перегонные и эскалаторные тоннели, транспортные узлы, а также вспомогательные сооружения, такие как тоннельные сбойки и камеры съездов. Места пересечения тоннелей образуют тройниковые соединения цилиндрических оболочек, в которых формируется сложное пространственное напряженно-деформированное состояние, требующее детального анализа. Ранее авторами был выполнен численный анализ напряженно-деформированного состояния ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек, взаимодействующих с грунтовым основанием [8–9]; настоящая работа продолжает это исследование в части обоснования размеров расчетной области.

При численном моделировании системы «оболочка — грунтовый массив» одним из ключевых вопросов является выбор размеров фрагмента грунтового массива, включаемого в расчетную модель. С одной стороны, массив должен быть достаточно большим, чтобы граничные условия на его торцах не искажали напряженно-деформированное состояние и прогнозируемую осадку поверхности. С другой стороны, чрезмерное увеличение расчетной области ведет к существенному росту числа конечных элементов и вычислительной трудоемкости, что особенно критично при многовариантном анализе. Несмотря на значительное число работ, посвященных прогнозу осадок земной поверхности при проходке одиночных и параллельных тоннелей [3–5], вопрос обоснованного выбора размеров расчетной области для тройникового соединения цилиндрических оболочек, взаимодействующего с грунтовым массивом, ранее систематически не исследовался, что определяет научную новизну настоящей работы. Объект исследования — пространственная система «оболочка — грунтовый массив», включающая тройниковое соединение цилиндрических оболочек и окружающее основание. *Цель исследования* — оценить влияние ширины фрагмента грунтового массива на величину и форму осадки поверхности в поперечном и продольном направлениях к оси примыкающей оболочки и определить размеры расчетной области, обеспечивающие приемлемую точность прогноза осадки при минимальных вычислительных затратах. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: построение серии конечно-элементных моделей с шириной массива от *1D* до *8D*; анализ напряженно-деформированного состояния системы и мульд осадок поверхности; обоснование рекомендуемого размера фрагмента массива.

2. Метод расчета

Выполнено моделирование пространственной системы, включающей тройниковое соединение цилиндрических оболочек и прилегающий грунтовый массив, с использованием контактных элементов для описания зазора между конструкцией и грунтом [8–9]. Окружающий массив задан трехмерными конечными элементами: SOLID186 — высокоуровневый изопараметрический объемный элемент с квадратичной аппроксимацией для моделирования трехмерных твердых тел и SOLID187 — изопараметрический тетраэдрический объемный элемент. Цилиндрическая оболочка задана двумерными элементами SHELL181 — четырехузловым оболочечным конечным элементом, предназначенным для моделирования тонких и умеренно толстых оболочек в структурных анализах и широко используемым благодаря своей универсальности и возможности учета сложных физических эффектов. Вопросы конечно-элементного моделирования цилиндрических оболочек, пластин и пространственных конструкций при статических и динамических воздействиях рассматривались в работах [10–17].

Основная цилиндрическая оболочка имеет диаметр D_1 = 5,50 м и толщину t_1 = 0,25 м; примыкающая оболочка — диаметр D_2 = 3,85 м и толщину t_2 = 0,20 м. Материал оболочек задан идеально упругой моделью со следующими параметрами: модуль упругости E_{sh} = 30 000 МПа, коэффициент Пуассона μ_{sh} = 0,2, плотность ρ_{sh} = 2300 кг/ м^3. Материал основания задан упругопластической моделью Мора — Кулона (O. Mohr, C.A. Coulomb) со следующими параметрами: модуль деформации E_{soil} = 30 МПа, коэффициент поперечной деформации μ_{soil} = 0,3, плотность ρ_{soil} = 2000 кг/м^3, сцепление C_{soil} = 10 кПа, угол внутреннего трения φ_{soil} = 25°. Ось оболочек расположена на глубине 30 м от

дневной поверхности. Физико-механические характеристики основания приняты по справочным данным для дисперсных грунтов и соответствуют диапазону значений, используемых в инженерной практике при проектировании подземных сооружений.

Упругопластическая модель Мора — Кулона выбрана как наиболее распространенная в инженерных расчетах модель грунта, требуя минимального числа определяемых параметров. Следует отметить, что модель Мора — Кулона с постоянным модулем деформации может несколько завышать осадки поверхности по сравнению с моделями, учитывающими модуль упругости при повторном нагружении (например, модель упрочняющегося грунта Hardening Soil); вместе с тем для целей настоящего исследования, направленного на оценку относительного влияния размеров расчетной области, такой выбор является приемлемым.

В рассмотренных восьми расчетных моделях тройникового соединения оболочек расстояние L от краев основной и примыкающей оболочек до боковых торцов массива принималось в диапазоне от $L = 1D$ до $L = 8D$ с шагом D, где D — диаметр основной оболочки. Граничные условия заданы следующим образом: на нижней грани массива запрещены перемещения по всем трем координатным направлениям, на боковых (вертикальных) гранях запрещены перемещения в направлении нормали к соответствующей грани при сохранении свободы вертикальных перемещений. Нагрузка на систему приложена от собственного веса конструкций и грунтового массива. Общий вид конечно-элементной сетки модели и тройникового соединения при $L = 5D$ приведен на рис. 1 и 2.

Численное решение выполнено в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2. Расчет является физически и конструктивно нелинейным (нелинейность обусловлена упруго-пластической моделью грунта и контактным взаимодействием тел) и выполнен в статической постановке с использованием неявного решателя. Нагрузка от собственного веса прикладывалась пошагово; на каждом шаге равновесие достигалось итерационным методом Ньютона — Рафсона с критериями сходимости по силам и перемещениям.

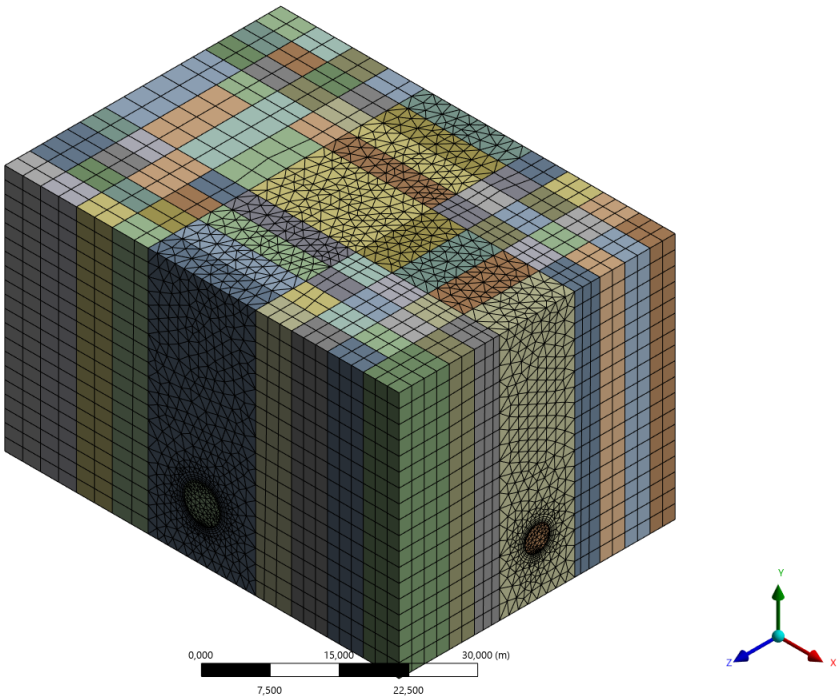


Рис. 1. Общий вид конечно-элементной сетки модели «оболочка — массив» при $L = 5D$

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2.

Figure 1. General view of the finite element mesh of the «shell — soil» model at $L = 5D$

S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

Характерный размер элемента цилиндрических оболочек имеет величину 0,15 м. Для модели с $L = 5D$ общее число конечных элементов составляло порядка 5×10^5, число узлов — порядка 8×10^5. Предварительно выполнена проверка сходимости решения по сетке: измельчение элементов прекращалось при условии, что изменение максимальной осадки поверхности не превышает 2 % по сравнению с более грубой сеткой, что подтверждает независимость представленных результатов от плотности дискретизации.

Контактное взаимодействие между внешней поверхностью оболочек и грунтом задано парами контактных элементов CONTA174 — TARGE170 в постановке «поверхность — поверхность». Использован метод множителей Лагранжа, где возможно раскрытие зазора при растяжении. Касательное взаимодействие описано моделью трения Кулона с коэффициентом трения 0,3.

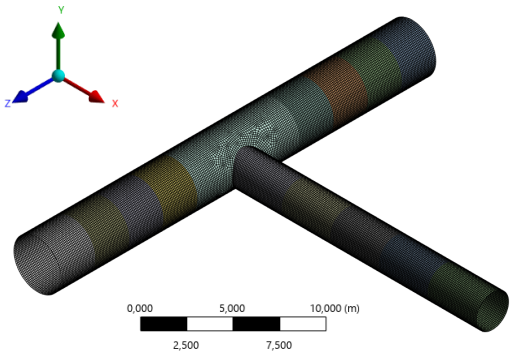


Рис. 2. Общий вид конечно-элементной сетки тройникового соединения оболочек при $L = 5D$

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2.

Figure 2. General view of the finite element mesh of the T-connection of the shells at $L = 5D$

S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

3. Результаты и обсуждение

По результатам расчета для каждой модели получены поля вертикальных перемещений грунтового массива и эквивалентных напряжений по Мизесу в теле оболочек тройникового соединения. Изополя вертикальных перемещений массива (вид сверху) и максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу по внешней стороне стенок оболочек при $L = 5D$ приведены на рис. 3 и 4.

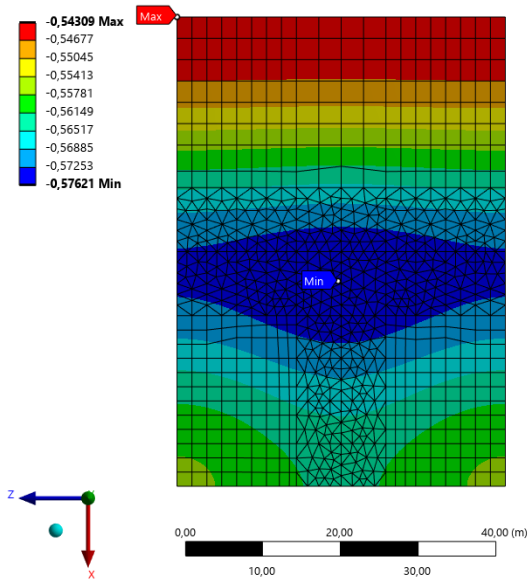


Рис. 3. Изополя вертикальных перемещений массива при $L = 5D$ (вид сверху)

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2.

Figure 3. Contour plot of vertical displacements of the soil body at $L = 5D$ (top view)

S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

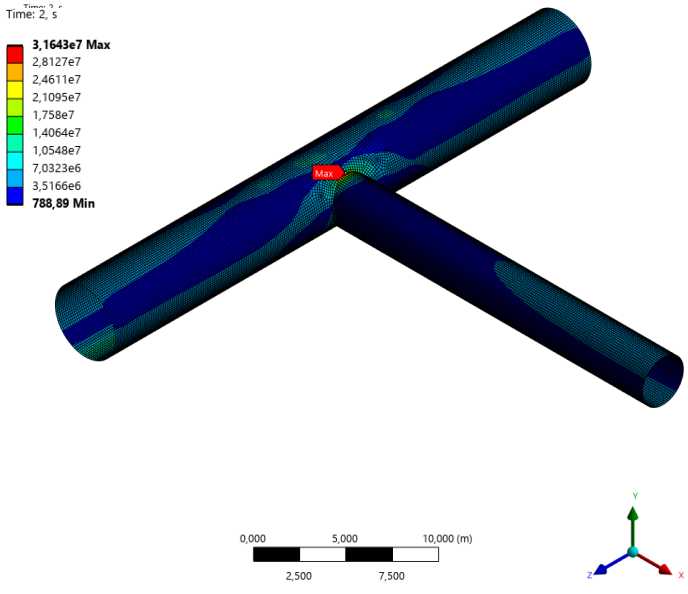


Рис. 4. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу по внешней стороне стенок оболочек тройникового соединения при $L = 5D$

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2.

Figure 4. Maximum equivalent stresses (von Mises) on the outer side of the walls of the T-connected shells at $L = 5D$

S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

Эквивалентные напряжения по Мизесу σ_e найдены 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.

Анализ полей эквивалентных напряжений показывает, что наибольшие значения напряжений по Мизесу локализуются в зоне сопряжения основной и примыкающей оболочек, в то время как в остальном теле оболочек уровень напряжений существенно ниже. Такой характер распределения типичен для тройниковых соединений и качественно согласуется с результатами, полученными ранее для ортогонально пересекающихся цилиндрических оболочек, взаимодействующих с основанием [8–9]. Это подтверждает, что именно область сопряжения оболочек является наиболее ответственным участком конструкции и требует особого внимания при назначении сетки конечных элементов и интерпретации результатов расчета.

Для оценки влияния ширины фрагмента массива построены семейства кривых мульд осадок верхней поверхности массива в поперечном и продольном направлениях к оси примыкающей цилиндрической оболочки, полученные в результате восьми расчетных случаев при L от $1D$ до $8D$ (рис. 5 и 6). Следует обратить внимание, что максимум осадок расположен не над осью основного тоннеля, а смещен в сторону примыкающей оболочки.

Из представленных графиков следует, что при ширине расчетного массива от $L = 1D$ до $5D$ заметны изменения как в величинах осадок, так и в форме мульды оседания. Это связано с тем, что при малой ширине массива влияние оболочки не может свободно распространяться в стороны, что приводит к увеличению осадок. При дальнейшем увеличении размеров расчетной области ($L \geq 5D$) изменение формы и глубины мульды становится незначительным.

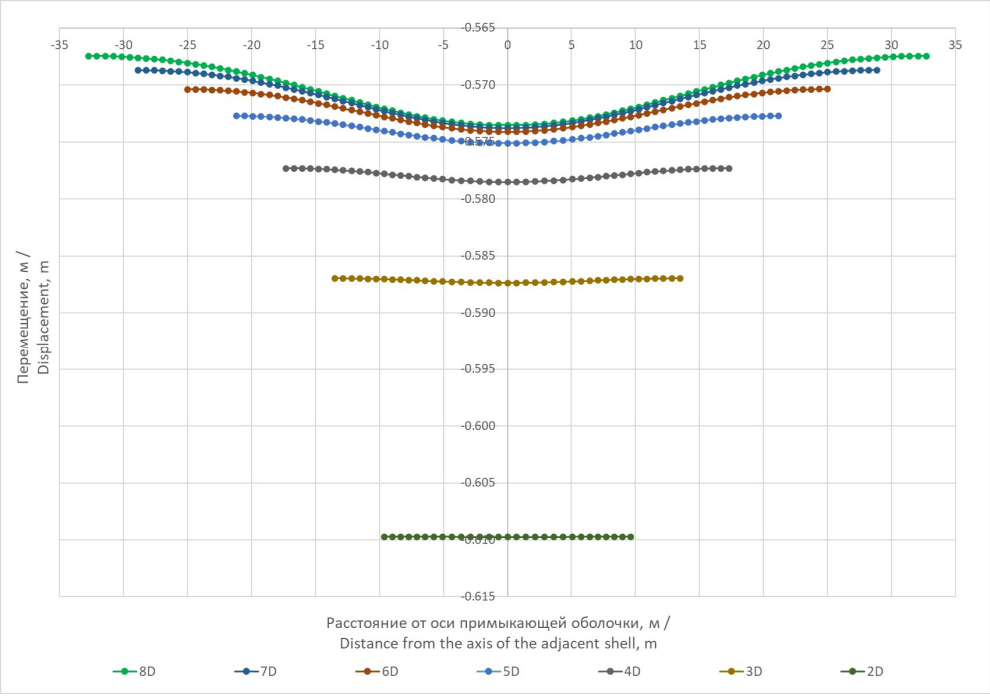


Рис. 5. Набор кривых мульд осадок на поверхности массива в поперечном направлении к оси примыкающей оболочки при L от $2D$ до $8D$

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2.

Figure 5. Family of surface settlement trough curves in the transverse direction relative to the axis of the adjoining shell at L from $2D$ to $8D$

S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

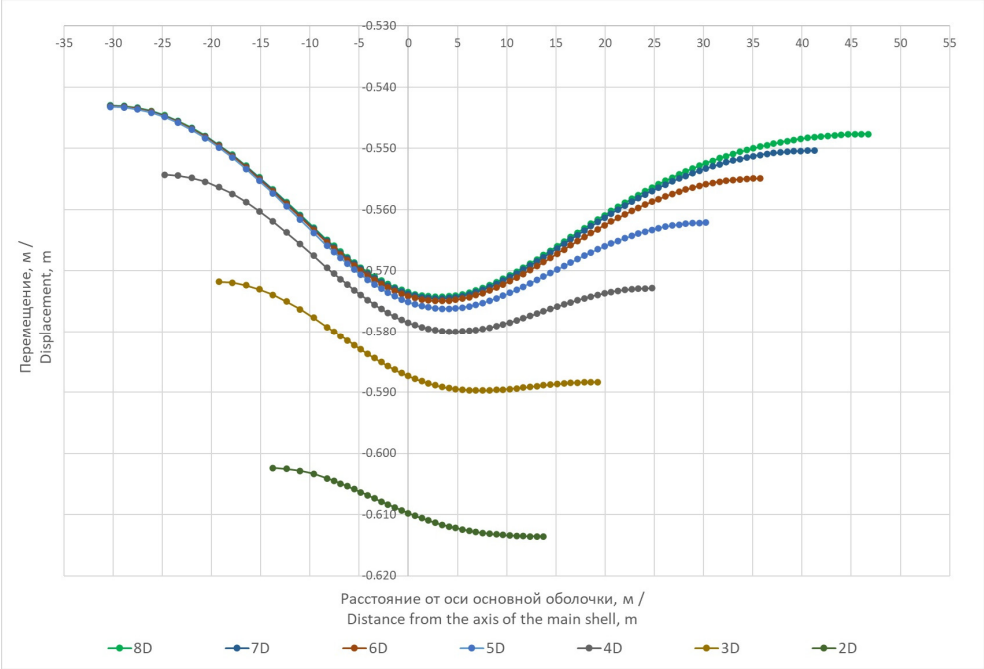


Рис. 6. Набор кривых мульд осадок на поверхности массива в продольном направлении к оси примыкающей оболочки при L от $2D$ до $8D$

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2.

Figure 6. Family of surface settlement trough curves in the longitudinal direction relative to the axis of the adjoining shell at L from $2D$ to $8D$

S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

С физической точки зрения данный эффект объясняется тем, что при недостаточной ширине расчетной области жесткие граничные условия на боковых торцах массива попадают в зону активного влияния конструкции и стесняют свободное развитие поля перемещений грунта. В результате формируется искусственно завышенная и более «зажатая» мульда оседания, не отражающая действительную работу неограниченного в плане массива. По мере удаления боковых границ от оболочек их влияние на напряженно-деформированное состояние грунта в окрестности тройникового соединения ослабевает и получаемое решение приближается к решению для полупространства.

Сопоставление кривых, полученных для последовательно увеличивающихся значений L, показывает, что разница между соседними расчетными случаями монотонно уменьшается: наибольшие отличия наблюдаются для моделей малой ширины, тогда как кривые, соответствующие значениям $L = 5D$ и более, практически совпадают как по глубине, так и по форме мульды. Это свидетельствует о сходимости решения по размеру расчетной области и позволяет считать результат, получаемый при $L \geq 5D$, устойчивым по отношению к дальнейшему расширению фрагмента массива.

Для количественной оценки сходимости решения по размеру расчетной области использован относительный показатель — изменение максимальной осадки поверхности δ при переходе от модели шириной L к модели шириной $L + D$ (в процентах). Результаты приведены в таблице. Относительное изменение максимальной осадки монотонно убывает с ростом L и при $L \geq 5D$ не превышает 2 %, что принято в качестве критерия достаточности размеров расчетной области.

Сравнение мульд осадок в поперечном и продольном направлениях к оси примыкающей оболочки показывает качественно схожую тенденцию затухания влияния границ при увеличении размеров расчетной области. При этом в продольном направлении более выраженно проявляется асимметрия мульды: ее максимум смещен в сторону примыкающей оболочки, что обусловлено несимметричной геометрией тройникового соединения и дополнительным догружением массива со стороны примыкающего тоннеля. Данную особенность необходимо учитывать при назначении контрольных

точек геотехнического мониторинга осадок земной поверхности над подобными узлами подземных сооружений.

Полученные результаты качественно согласуются с данными исследований осадок земной поверхности [3–5].

Сходимость максимальной осадки поверхности по размеру расчетной области (поперечное направление к оси примыкающей оболочки)
Convergence of the maximum surface settlement with the model domain width (transverse direction relative to the axis of the adjoining shell)

Ширина массива *L* / Model domain width *L*	**Максимальная осадка, м / Maximum vertical movement, cm**	**Относительное изменение δ, % / Relative change δ, %**
1*D*	–0,6799	–
2*D*	–0,6098	10,3
3*D*	–0,5884	3,5
4*D*	–0,5765	2,0
5*D*	–0,5751	< 1,0
6*D*	–0,5741	< 1,0
7*D*	–0,5738	< 1,0
8*D*	–0,5735	< 1,0

И с т о ч н и к: выполнено авторами в программном комплексе ANSYS Mechanical 2025 R2 /
S o u r c e: made by the authors in ANSYS Mechanical 2025 R2 software package.

4. Заключение

1. На основе анализа напряженно-деформированного состояния системы «оболочка – грунтовый массив» рекомендовано для инженерных расчетов принимать ширину массива $L \geq 5D$, что обеспечивает достаточную точность прогнозирования осадки без чрезмерного увеличения числа элементов конечно-элементной модели. Хотя дальнейшее увеличение размеров расчетного фрагмента способно лишь незначительно повысить точность, оно существенно повышает вычислительную трудоемкость, поэтому значение $L = 5D$ является предпочтительным.

2. Установлено, что максимум осадки поверхности расположен не над осью основного тоннеля, а смещен в сторону примыкающей оболочки, что необходимо учитывать при оценке деформаций земной поверхности над тройниковыми соединениями.

3. Выбор размера расчетной области особенно важен при многовариантном анализе, так как позволяет поддерживать баланс между скоростью расчета и достоверностью математического моделирования.

4. Полученные количественные результаты и рекомендуемое значение $L = 5D$ справедливы для рассмотренного варианта системы (соотношение диаметров оболочек, глубина заложения, заданные характеристики грунта) и принятой упругопластической модели Мора – Кулона. При существенном изменении геометрии узла, глубины заложения или жесткости грунта значение порога может отличаться, что требует дополнительной проверки.

5. Установленный критерий $L \geq 5D$ может использоваться как первое приближение при назначении размеров расчетной области для аналогичных пересечений подземных сооружений. Уточнение критерия для других конфигураций, а также применение других моделей грунта составляют направление дальнейших исследований.

Список литературы

1. *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

2. *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 EDN: YHVYJC

3. *Niu G., He X., Xu H., Dai S.* Tunnelling-induced ground surface settlement: A comprehensive review with particular attention to artificial intelligence technologies // Natural Hazards Research. 2024. Vol. 4. No. 1. P. 148–168. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.11.002 EDN: SFZQPC

4. *Huat Ch.Yu., Armaghani D.Ja., Lai S.H., Motaghedi H., Asteris P.G., Fakharin P.* Analyzing surface settlement factors in single and twin tunnels: A review study // Journal of Engineering Research. 2025. Vol. 13. Issue 3. P. 2096–2108. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.05.009 EDN: QHYEWN

5. *Ahmed K.S., Sharmin J., Ansary M.A.* Numerical investigation of tunneling induced surface movement: A case study of MRT line 1, Dhaka // Underground Space. 2023. Vol. 12. P. 116–136. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.02.008 EDN: VOOZJH

6. *Wang X., Wang Yu., Yang Yi., Fang Y., Zhuo B.* Distribution characteristics and spatial correlation analysis of defects in in-service metro shield tunnels: A case study // Tunnelling and Underground Space Technology. 2025. https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107397 EDN: KIWCMI

7. *Yao Y., Fang Y., He C., Xu G., Yao Z., Hu X.* Spatial motion patterns and force transmission characteristics of muck particles in EPB shield tunneling: An FDM–DEM coupling analysis // Underground Space. 2025. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.05.005 EDN: HECKIX

8. *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

9. *Косицын С.Б., Акулич В.Ю.* Пространственный расчет тройниковых соединений цилиндрических оболочек с учетом изменения расчетной модели во времени // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2025. Т. 21. № 3. С. 181–191. https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3 EDN: SSMRFB

10. *Акимов П.А., Мозгалева М.Л.* Вейвлет-реализация дискретно-континуального метода конечных элементов на основе B-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

11. *Мангушев Р.А., Дьяконов И.П., Полунин 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

12. *Клочков Ю.В., Джабраилов А.Ш., Ищанов 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

13. *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

14. *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

15. *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

16. *Зверяев 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

17. *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

References

1. 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

2. 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 EDN: YHVYJC

3. Niu G, He X, Xu H, Dai S. Tunnelling-induced ground surface settlement: A comprehensive review with particular attention to artificial intelligence technologies. *Natural Hazards Research*. 2024;4(1):148–168. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.11.002 EDN: SFZQPC

4. Huat Ch.Yu, Armaghani D.Ja, Lai SH, Motaghedi H, Asteris PG, Fakharin P. Analyzing surface settlement factors in single and twin tunnels: A review study. *Journal of Engineering Research*. 2025;13(3):2096–2108. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.05.009 EDN: QHYEWN

5. Ahmed KS, Sharmin J, Ansary MA. Numerical investigation of tunneling induced surface movement: A case study of MRT line 1, Dhaka. *Underground Space*. 2023;12:116–136. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.02.008

6. Wang X, Wang Y, Yang Y, Fang Y, Zhuo B. Distribution characteristics and spatial correlation analysis of defects in in-service metro shield tunnels: A case study. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2025. https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107397

7. Yao Y, Fang Y, He C, Xu G, Yao Z, Hu X. *Spatial motion patterns and force transmission characteristics of muck particles in EPB shield tunneling: An FDM–DEM coupling analysis*. Underground Space. 2025. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2025.05.005

8. Kosytsyn SB, Akulich VYu. 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. (In Russ.) https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-4-303-310 EDN: TVXXYV

9. Kosytsyn SB, Akulich VYu. Three-dimensional analysis of t-connections of cylindrical shells considering stages of construction. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. (In Russ.) 2025;21(3):181–191. https://doi.org/10.22363/1815-5235-2025-21-3 EDN: SSMRFB

10. Akimov PA, Mozgaleva ML. 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

11. Mangushev RA, Dyakonov IP, Polunin VM, Bashmakov IB, Paskacheva DA. 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

12. Klochkov YuV, Dzhabrailov ASh, Ishchanov TR, Marchenko SS, Andreev AS, Klochkov MYu. Finite element calculation of an elliptical cylinder in a geometrically nonlinear formulation using the vector form of the interpolation procedure. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2022;(1):58–71. (In Russ.) https://doi.org/10.15593/perm.mech/2022.1.06 EDN: MYVJBF

13. Lalin VV, Le TKCh. Calculation of building structures for several dynamic effects with a static accounting of higher forms of oscillation. *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

14. Mozgaleva ML, Akimov PA. 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. https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-3-157-172 EDN: MFCJOI

15. Yankovsky AP. The refined model of viscoelastic-plastic 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

16. Zveryaev EM, Pyhtyn AV, Hoa VD. Spatial problem for rectangular elastic plate. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions.* 2021;4(297):2–11. (In Russ.) https://doi.org/10.37538/0039-2383.2021.4.2.11 EDN: SUBZUM

17. Bakulin V.N. Model for analysis of the stress-strain state of three-layer cylindrical shells with rectangular cutouts. *Mechanics of Solids*. 2022;57(1):102–110. https://doi.org/10.3103/S0025654422010095 EDN: EDN: KXXBKL